JAHRGANG LI. 1901. HEFT IV BIS VI.

Der Pharos von Alexandria.

(Mit Abbildungen auf Blatt 19 bis 21 im Atlas.)

Es ist allgemein bekannt, dafs der Pharos, der Erstling einer grofsen Denkmälergattung, zu den Hauptsehenswürdigkeiten nicht blofs Alexandrias und Aegyptens, sondern der alten Welt gehört hat. Prüft man aber eingehend die Ueberlieferung, so befremdet die Thatsache, dafs in den geretteten Schätzen der klassischen Litteratur seiner immer nur gelegentlich und streifend gedacht wird. Eine wenn auch kurze Beschreibung, wie wir sie von dem Scheiterhaufen des Hephästion bei Diodor oder von dem Prachtzelte des Ptolemaios Philadelphos bei Athenäus besitzen, fehlt nach den Verlusten, welche die Handschriften des Philo von Byzanz erlitten, und es ist kaum eine Aussicht vorhanden, dafs diese Lücke je gefüllt werden wird. Wenn sich daraus erklärt, dafs von Seite der in erster Linie Berufenen, den Architekten, bisher sehr wenige Wiederherstellungen versucht worden sind, so liegt doch kein Grund vor, in solcher Trägheit dauernd zu verharren.[1]) Vielmehr scheint es angesichts der Erfolge des rastlos arbeitenden Spatens doppelte Pflicht zu sein, das vorhandene, aber müfsig schlummernde Material mittels des Zirkels und der Feder lebendig zu machen, damit nach und nach die wichtigste Epoche der antiken Baugeschichte — die der hellenistischen Baukunst — in ihren Hauptwerken allgemeiner bekannt werde. Von solchen Gedanken ausgehend, ist von mir im Jahre 1899 das Mausoleum von Halikarnafs in dieser Zeitschrift veröffentlicht worden. Als zweites bahnbrechendes Bauwerk möge der Pharos von Alexandria sich anschliefsen, welcher — ein echtes Kind seiner Zeit — durch die Kühnheit des Entwurfes und die Grofsartigkeit der völlig neuen Erscheinung sehr frühe zu den sieben Weltwundern gerechnet wurde.

I. Geschichtliches.

Nachdem Alexander infolge des Sieges bei Issus seinen Marsch nach Syrien gerichtet und Tyrus wie Sidon trotz hartnäckigen Widerstandes erobert hatte, war Aegypten für den Perserkönig verloren. Schon in Pelusium übergab der Satrap Mazaces dem Sieger die Herrschaft, und wenige Tage später — im November 332 — opferte dieser in Memphis den alten Landesgöttern. Schon damals von dem Gedanken erfüllt, dem griechischen Handelsgeiste neue bisher nicht betretene Bahnen zu eröffnen und das fast erstarrte Aegypten kräftig zu beleben, beschlofs er die Gründung einer Stadt, die, seinen Namen tragend, ein Ausgangspunkt für den indischen Welthandel werden sollte. Sie mufste an Aegyptens Küste liegen, aber ob an einer der Nilmündungen oder jenseits derselben an Libyens Grenze war fraglich.

Von Memphis auf dem Kanobischen Nilarme hinabfahrend, hat Alexander nach Prüfung der Localverhältnisse sich rasch entschieden, die neue Stadt da anzulegen, wo vor der alten Grenzstadt Rhakotis die allen Griechen aus Homer wohlbekannte Insel Pharos in einer solchen Entfernung (1200 bis 1300 m) vorgelagert war, dafs mit ihrer Hülfe ein grofser und wohlgeschützter Doppelhafen — für Kriegs- und Handelszwecke — geschaffen werden konnte.[2]) Als ein zweiter Vorzug des Platzes erschien die Nähe des durch mehrere Canäle mit dem Nile verbundenen grofsen Mareotissees im Süden mit seinem Fischreichthume und dem Fruchtsegen zahlreicher Dörfer an seinen Ufern. Weil der See an dem jährlichen Steigen des Niles theilnahm, konnte die Trinkwasserfrage sicher und dauernd geregelt werden, sobald man für die erforderlichen Cisternen in dem Felsboden nebst ihren Zuleitungen gesorgt hatte. In gesundheitlicher Beziehung empfahl sich die Stelle, weil in der heifsesten Zeit, im Juli, die Nordwinde einsetzten und sechs bis acht Wochen lang die Tageswärme milderten. Auch für die Wehrhaftigkeit war die Lage günstig, weil die Stadt nur an der Ost- wie Westseite mit Erfolg angegriffen werden konnte und zwar hier wie dort auf geringe Frontbreiten.

Mit dem Entwurfe des Stadtplanes betraute der König den Architekten Deinokrates aus Rhodos,[3]) dessen Ideenreichthum ihn begeistert hatte und der sich seitdem in seinem Gefolge befand; dann brach er mit dem Heere zum Orakel des Zeus Ammon in der Oase Siwah auf. Durchdrungen von der Bedeutsamkeit der alle bisherigen Stadtgründungen, wie Piräus, Thurii, Rhodos und Halikarnafs, weit übertreffenden Aufgabe hat Deinokrates sofort an Ort und Stelle die nöthigen Unterlagen gesammelt und mit Aufbietung aller Kräfte die Sache so rasch gefördert, dafs er wenige Monate später — im Frühjahre 331 — dem vom Ammonium direct nach Memphis zurückgekehrten Herrscher die aufgestellten Pläne vorlegen konnte.[4]) Sie wurden gutgeheifsen und der Baubeginn befohlen, zugleich aber dem Architekten als Verwaltungsbeamter ein aus Naukratis stammender Grieche, Kleomenes, welcher die Sitten und Sprache des Landes kannte, zur Seite gestellt.[5]) Ueber den Fortgang der Arbeiten sind wir nicht unterrichtet, dürfen aber annehmen, dafs auf Grund der reichen Erfahrungen in der Schule des Hippodamos von Milet, zu welcher Deinokrates zu rechnen ist,[6]) und bei seinem eigenen Ehrgeize die Stadt ebenso planmäfsig wie schnell emporgewachsen ist.

1) Einiges aber nicht ausreichendes Material für den antiken Pharos findet sich bei dem in technischer Beziehung mustergültigen Werke: Allard, Les Phares; histoire, construction, éclairage. Paris 1889.

2) Arrian., Anab. ed. Didot. III, 1, 1—5.

3) Pseudo-Callisthenes in d. Didot-Ausg. I, 31. Vitruv II, *praef.* bezeichnet ihn als Makedonier. Eusthatius §. 229, p. 980 R. läfst ihn aus Rhegium stammen. Mir scheint das Wahrscheinlichste die Herkunft aus Rhodos zu sein.

4) Arrian. III, 4.

5) Droysen, Geschichte Alexanders d. Gr. I, 2[II] S. 324. Arrian. III, 5.

6) Entscheidend hierfür ist die Thatsache, dafs die Anordnung und Ausbildung der drei Häfen von Alexandria auf dem Vorbilde von Rhodos beruht.

Der Oberleiter ist nicht dauernd am Platze geblieben, sondern aufser dem Kleomenes nur ein Stab von Hülfsarbeitern, unter denen Dexiphanes von Knidos, sowie später Heron, Krates u. a. genannt werden.[7]) Sicherlich hat der geniale Meister den rastlosen Eroberer auf mehreren Feldzügen begleiten müssen, weil diesem das Wissen und Können des Architekten und zwar nicht blofs für die vielen Stadtgründungen unentbehrlich war. So finden wir ihn sieben Jahre später, im Frühjahre 324, in Susa mit der Errichtung des riesigen Prachtzeltes für die Hochzeit Alexanders und seiner Freunde und Feldherren mit den Schwestern und Töchtern des persischen und medischen Adels beschäftigt. Als darauf im Herbste desselben Jahres Hephästion in Ekbatana starb, war er es, welchen der König voran nach Babylon schickte, um dort für den tiefbetrauerten Jugendfreund den mit den höchsten Mitteln der bildenden Kunst aufzubauenden Scheiterhaufen herzustellen. Dreitausend griechische Künstler und Werkleute sollen den Meister begleitet haben. Dank ihrem Eifer und den überreichen Mitteln war der ungeheure Prachtbau — auf quadratischer Basis von 164 m Seite in fünf Geschossen bis zur Höhe von 65 m aufsteigend — in sechs Monaten vollendet und wurde mit dem einbalsamirten Leichname des jugendlichen Heros Ende Mai 323 in Asche verwandelt.[8])

Seitdem wird der Name des Deinokrates in unseren Quellen nicht mehr genannt, obschon des Künstlers Schaffen sicherlich nicht aufgehört hat. Denn als Alexander wenige Wochen darauf, am 11. Juni, plötzlich starb, wurde sein Körper zunächst in Babylon aufbewahrt und dann beschlossen, ihn nach Aegae zur Ahnengruft der makedonischen Könige überzuführen. Der zu diesem Behufe in ebenso eigenartiger Form wie in nie gesehener Pracht und Gröfse im Laufe eines Jahres ausgeführte Leichenwagen ist schwerlich von einem anderen Architekten entworfen und überwacht worden als von Deinokrates. Ebenso nahe liegt die Annahme, dafs er den gewaltigen Trauerzug, der über Damaskus nach Syrien ging, nicht blofs bis dahin begleitet hat, wo ihn der zum Satrapen von Aegypten erwählte Ptolemaios empfing, sondern auch bis nach Memphis, wo dieser die Königsleiche zunächst beisetzen liefs, um ihr später in seiner Residenz Alexandria ein grofsartiges Mausoleum zu erbauen. Dieses Denkmal, Sema genannt, ist infolge der schweren Kämpfe, in welche Ptolemaios durch jenen Leichenraub verwickelt wurde, nicht gleich begonnen und dann so langsam gefördert worden, dafs die endliche und dauernde Beisetzung erst der Sohn — Ptolemaios II. Philadelphos — bewirkt hat.[9]) Das Jahr ist nicht überliefert, jedenfalls geschah es nach 283. Wenn daher für unsere Kenntnifs Deinokrates seit 322/21 entschwindet und wir sein Todesjahr nicht kennen, so sind wir glücklicherweise von der Hauptschöpfung seines Lebens — dem Plane von Alexandria — infolge der seit vierzig Jahren betriebenen Forschungsarbeiten so weit unterrichtet, dafs wir den hohen, ja mustergültigen Werth derselben feststellen können.

7) Brunn, Gesch. d. gr. K. II, 243 nach Pseudo-Callisthenes u. Jul. Valerius. Aus dem Chron. Pasch. 363 ist Dexiphanes, welcher unter den Architekten bei Brunn fehlt, hinzuzufügen.

8) Diodor XVII, 115.

9) Pausanias I, 7, 1.

Wie der Stadtplan auf Blatt 21 Abb. 7 erkennen läfst,[10]) hat aufser der Pharosinsel eine östlich belegene Landzunge Lochias nebst einer Reihe nordwestlich ihr vorgelagerter Klippen die erste natürliche Grundlage gebildet. Die zweite war eine künstliche, sie bildete ein in passender Entfernung von Lochias schräg nach der Insel geschütteter Damm, nach seiner Länge das Heptastadion genannt. Er war es, welcher zwei Häfen schaffen half; das grofse Ostbecken wurde zum Kriegshafen, das kleinere im Westen zum Handelshafen bestimmt. Zu diesem Behufe verband man den letzteren durch einen mit Schleusen versehenen Canal mit dem Mareotissee, sodafs auf lange Uferstrecken ein directer Umschlag der Erzeugnisse und Waren stattfinden konnte. Der Handelshafen, nach einem kyprischen Könige und Verwandten des Ptolemaios, der Hafen des Eunostos genannt, erhielt noch nach Süden, aber von Ringmauern umschlossen, eine beckenartige Erweiterung — Kibotos —, die zur Verfrachtung der kostbarsten Handelswaren bestimmt war. Zur nothwendigen Verbindung beider Häfen dienten zwei kurze Wasserstrafsen, die oben überbrückt waren, sodafs hier ungehindert oben Landverkehr und unten Seeverkehr stattfinden konnten.

Die Stadt selbst, in der Form eines Rechteckes angelegt, wurde durch zwei sehr breite Hauptstrafsen, die sich rechtwinklig kreuzten und das Grundschema für alle übrigen Parallelstrafsen bildeten, in vier ungleich grofse Viertel getheilt.[11]) Die ostwestliche längere Hauptstrafse begann im Osten am Kanobischen Thore und endigte im Westen nahe dem Kibotoshafen. Die senkrecht zu ihr angeordnete kürzere, aber breitere Strafse (etwa 33 m) — die Königsstrafse — lief vom Palaste am inneren Aechsel von Lochias nach dem Mareotissee, ohne ihn zu erreichen. In ihrem Südtheile streifte sie den höchsten Punkt der felsigen Küste, der — später künstlich noch erhöht — nach einer Pansgrotte das Paneion genannt wurde. Seinen etwa 30 m über See liegenden Gipfel konnte man mittels eines Schneckenweges ersteigen, um einen weiten Ueberblick über die Stadt, ihre Häfen, Strafsen und Denkmäler zu gewinnen.

Neben dem Palaste auf Lochias lag der Privathafen des Königs sowie ein Artemistempel. Von hier aus dehnte sich das Königsviertel in südwestlicher Richtung bis zur Längsstrafse aus und umschlofs aufser dem Tempel des Poseidon das Theater, das Sema mit den Ptolemäergräbern, die Agora, das Museum mit den Bibliotheksälen, das grofse Gymnasion und endlich am Hafen das von Augustus (22 v. Chr.) erbaute und an der Front mit zwei Obelisken gezierte Cäsareum. Westlich und südlich schlossen sich unmittelbar daran die Viertel der Griechen und Aegypter, während die Stadttheile östlich von der Königsstrafse der zahlreichen jüdischen Bevölkerung überwiesen waren. Aufserhalb der Stadt — im Südwesten — erhob sich, schon weither vom Handelshafen aus gesehen, auf einem zweiten durch Terrassenmauern künstlich gestuften Hügel der riesige Prachtbau des Serapeion, zu welchem eine breite Treppe von hundert Stufen emporführte. Dicht daneben, am Südwestfufse, war das Stadion angeordnet, während der zweite und viel stärker

10) Den Plan verdanke ich der Güte meines Freundes Prof. Dr. Sieglin. Vgl. hierzu den von Puchstein in Pauly-Wissowa's Real-Encykl., S. 1376 veröffentlichten Artikel Alexandria.

11) Strabo XVII. 1, 6 ff. u. Diodor XVII. 52.

besuchte Wettkampfplatz, der grofse Hippodrom, wohl absichtlich möglichst weit entfernt vor das östliche Hauptthor gelegt war.

Auf allen Seiten schützten hohe und starke Mauern mit wenigen Thoren die ganz regelmäfsig erbaute Stadt, und gleicher Wehrhaftigkeit erfreute sich die Osthälfte der Pharosinsel. Den Hauptnerv, an dem das Wohl und Wehe der ganzen Anlage hing, das Heptastadion, deckten noch zwei besondere Brückenköpfe an der Stadt- wie Inselseite. Vor der Ostspitze der Insel stand endlich auf einer abgetrennten Klippe der weltberühmte Leuchtthurm innerhalb eines besonderen Castrums und bildete mit einem zweiten Castell, welches am Ende einer Doppelmauer — Diabathra — erbaut war, das starke Eingangsthor des grofsen Hafens, der im Kriegsfalle durch eiserne Ketten gesperrt werden konnte. Beide Hauptstrafsen sowie viele Querstrafsen, auch die Ladestrafsen an den Häfen, waren gepflastert, und als ein besonderer Vorzug galt die Thatsache, dafs der überwiegende Theil der Strafsen von den Nordwinden bestrichen werden konnte. Für reichliche Zuführung und Vertheilung von Trinkwasser bis zum Pharos hin — und zwar zum Theil schon durch Dükeranlagen, wie auf dem Heptastadion — war trefflich gesorgt, und die Feuersicherheit konnte, wenn man von den älteren Denkmalbauten, wie von den Tempeln, dem Museum und Königspalästen absah, für fast vollkommen gelten, weil die meisten Privathäuser überwölbt waren.[12]) Nur ein Moment fehlte, was der griechische Schönheitssinn gewifs schmerzlich empfunden hat, das landschaftlich schöne Stadtbild von der Seeseite, das so viele Städte auf dem Festlande oder auf den Inseln, Athen, Halikarnafs, Rhodos, Knidos, Smyrna, Puteoli u. a. besafsen. Alexandria, welches der vielgereiste Ammianus Marcellinus als die Krone aller Städte bezeichnet, ist so wenig wie Rom in einem Tage erbaut worden, sondern mit der Fülle seiner Denkmäler nach und nach in etwa zwei Jahrhunderten entstanden, aber die Hauptgedanken des ersten Entwurfes hat man stets festgehalten. Im einzelnen verbesserungsfähig, war das Ganze doch die tiefdurchdachte Schöpfung eines an Erfahrungen reichen Genius, für welche die gesamte Baugeschichte kein zweites Beispiel hat. Daher verdient Deinokrates noch heute den hohen Ruhm, den ihm Mit- und Nachwelt im Alterthume gezollt haben.

Vielleicht hat Alexander einen Antheil an dieser Auszeichnung, weil solche Bestimmungen wie die, dafs die Königsburg an Umfang und Pracht alle Stadttheile übertreffen sollte — sie hat nach Plinius ein Fünftel, nach Strabo ein Viertel des ganzen Flächenraumes bedeckt —, gewifs nicht von dem Architekten stammte, sondern von dem Könige selbst, der damals möglicherweise an eine Residenz in Aegypten dachte. Man darf diese Vermuthung um so mehr aussprechen, weil Arrian nach älteren Quellen ausdrücklich berichtet: der König habe an Ort und Stelle die Lage der Tempel und der Agora in der Stadt selbst bestimmt.[13])

Ob der Bau eines Leuchtthurmes schon im Grundplane der Stadt vorgesehen war, wissen wir nicht. Es ist aber wegen der starken Brandung, der die Pharosinsel durch ihren Klippenreichthum bei Nordwinden ausgesetzt ist, sehr wahrscheinlich. Wo dieser gestanden, ist unbekannt, jedenfalls ist der weltberühmte Pharos erst ein Menschenalter nach der Stadtgründung begonnen worden und zwar nach Suidas[14]) „als Pyrrhos König von Epiros wurde", Ol. CXX, 2 = 299. In der langen Regierungszeit des Ptolemaios Lagi ist dies ein wohlgeeigneter Zeitpunkt für den Beginn eines eben so neuen und grofsartigen, als auch schwierigen und kostbaren Werkes. Damals stand nach harten Kämpfen die Herrschaft des vom Leibwächter zum Könige emporgestiegenen Dynasten fest und die Nachfolge war gesichert. Er selbst sehnte sich nach rühmlichen Friedensarbeiten, zumal im Interesse des immer mächtiger aufblühenden Handels, auch fehlten weder die Mittel noch der geeignete Mann.

Als Baumeister nennen Strabo, Plinius und Lucian den Sostratos von Knidos, Sohn des Dexiphanes. Von ihm und seinem Lebensgange wird Abschnitt IV handeln. Weil ihn Strabo als „Freund der Könige" bezeichnet, so steht fest, dafs er in angesehener Stellung auch noch unter dem Sohne und Nachfolger Ptolemaios I. Soter, nämlich Ptolemaios II. Philadelphos thätig gewesen ist. Und wenn auch die Chronik des Eusebius irrthümlich meldet, dafs der Pharos im Anfange der Regierung des letzteren erbaut worden sei,[15]) so darf man unter Bezugnahme auf die unverdächtige Nachricht des Suidas mit Sicherheit schliefsen, dafs nicht sein Beginn, sondern seine Vollendung unter Philadelphos fällt. Das Jahr ist allerdings nicht überliefert, doch wird das Datum von 280 für Abschlufs des Werkes der Wahrheit nahe kommen,[16]) denn bei den aufsergewöhnlichen Schwierigkeiten, welche die Lage und Beschränktheit des Bauplatzes, der häufige Kampf mit den Elementen und die nothwendigen Pausen im Betriebe neben der Gröfse und soliden Technik des Werkes hervorriefen, ist eine fast zwanzigjährige Bauzeit sehr wahrscheinlich.[17]) Diese Annahme wird auch durch die grofse Kostensumme, welche uns Plinius[18]) überliefert hat, nämlich von 800 Talenten = 3600000 ℳ oder $4^1/_2$ Millionen Franken bestens unterstützt. Dabei darf nicht übersehen werden, dafs eine lange Bauzeit für das Gelingen des Werkes von besonderem Vortheile war, weil sie die Möglichkeit bot, alle Fortschritte zu verwerthen, welche die überraschende Entwicklung der mathematischen Studien an dem 295 gegründeten Museum gerade damals fortdauernd zeitigten.

Die glückliche Vollendung des riesigen, besonders durch seine Höhe überraschenden Baues mufs auf die Zeitgenossen, Fürsten wie Völker, einen tiefen und nachhaltigen Eindruck gemacht haben. Daher befremdet es nicht, wenn wir von Plinius erfahren, dafs der König dem Künstler gestattet habe, den eigenen Namen auf das grofsartige Denkmal zu setzen und zwar als Weihender. In der That lautete die Inschrift, wie Strabo, Lucian und ein Scholion zu dem letzteren übereinstimmend melden: Sostratos, Dexiphanes

12) Hirtius, Bell. Alex. c. 1—5. Ammianus Marcellinus XXII, 16.

13) Arrian. III, 1.

14) Suidas s. v. Φαρος.

15) Eusebii Chron., can. ed. Schoene p. 118.

16) Erst nach Vollendung meiner Arbeit habe ich aus der Revue des études anciennes I. 1899, S. 261 ersehen, dafs Perdrizet in seinem lehrreichen Aufsatze über Sostratos auch das Jahr 280 als Abschlufs des Pharosbaues festgestellt hat.

17) Der Bau des Mausoleums zu Halikarnafs hat fünfzehn Jahre gedauert.

18) Plinius XXXVI, 12, 18.

Sohn aus Knidos, den rettenden Göttern für die Seefahrer. Was die Priesterschaft von Ephesus Alexander dem Grofsen verweigert hatte, gewährte hier königliche Huld dem Künstler. Es kann auch nicht zweifelhaft sein, wer dieser ungenannte König war. Plinius' Worte: *Magnificatur et alia turris, a rege facta in insula Pharo portum optinente Alexandriae, quam constitisse octingentis talentis tradunt, magno animo, ne quid omittamus, Ptolemaei regis, quo in ea permiserit Sostrati Cnidii architecti structura ipsa nomen inscribi* zielen offenbar auf den Stifter der Dynastie, der auch von Suidas genannt wird. Ptolemaios I. Soter hatte um 300 v. Chr. die Ausführung einer ganzen Reihe berühmter Werke der Bau- und Bildkunst — vergänglicher wie dauernder — erlebt, wie des Hochzeitzeltes in Susa, der Pyra des Hephästion, des Artemision zu Ephesus, der Helepolis des Demetrios Poliorketes und des Kolosses zu Rhodos. Ihm lag es daher nahe, für seine herrlich aufgeblühte Residenz ein gleich ruhmvolles Kunstwerk als dauerndes Denkmal seiner Regierung zu gewinnen, aber seiner staatsmännischen Sinnesweise entsprach es, keinen prahlerischen Prachtbau, sondern einen künstlerisch gestalteten Nutzbau für viele Jahrhunderte ausführen zu lassen. Es ist daher auch gleichgültig, über die Frage: wer unter „den rettenden Göttern" zu verstehen ist, eine Entscheidung zu treffen. — Was Lucian berichtet, dafs der Architekt jene Inschrift auf den Quadersteinen angebracht, aber sie dann mit Gipsmörtel überzogen habe, um auf dieser Unterlage eine etwas veränderte, auf den König als Weihenden zielende Widmung einzugraben, weil er als Techniker wufste, dafs nur die erste dauern würde, ist nichts als ein albernes Märchen, das keiner Widerlegung bedarf.[19])

Im Alexandrinischen Kriege, 47 v. Chr., bestand der Bau seine erste Probe. Sie war ernst und lief nicht ohne Schaden ab, denn beide Brücken des Heptastadion, sowie der Pharos, den Cäsar erst zu erobern und dann zu vertheidigen hatte,[20]) wurden stark beschädigt. Weil die zurückgebliebene Cleopatra die nothwendige Wiederherstellung übernahm, ist ihr Name an der Geschichte des Dammes und des Thurmes haften geblieben. Schon Ammianus schreibt ihr den Bau des ersteren zu, und von den arabischen Schriftstellern wird sie mehrfach als die Urheberin beider Bauwerke genannt.

Seit jener Epoche blieb der Pharos in der römischen Kaiserzeit standfest und wohlerhalten. So haben ihn am Schlusse des 4. Jahrhunderts Ammianus Marcellinus und am Anfange des 5. Jahrhunderts Bischof Epiphanius gesehen und bewundert.[21]) Dann aber trat der Verfall ein. — Unter der Regierung des Kaisers Anastasios I. (491 bis 510) mufste eine ebenso schwierige wie umfangreiche Wiederherstellung vorgenommen werden. Die besten Nachrichten liefert uns der Sophist Procopios von Gaza,[22]) weil wir aus seiner Lobrede trotz des Phrasenschwalles erfahren, dafs man die zum Schutze der Fundamente und Mauern des Pharos an seiner Nordfront in der See angeordneten Wellenbrecher — wahrscheinlich seit vielen Jahrzehnten — derartig vernachlässigt hatte, dafs ein Zusammenbruch des Thurmes zu befürchten stand. Der Kaiser habe, so sagt der Redner, diese Gefahr abgewandt und der Stadt ihren unsterblichen Besitz erhalten. Den Architekten nennt er nicht, es war einem Epigramme der Anthologie[23]) zufolge der Patricius Ammonios, welcher aber von einem Techniker gleichen Namens, der eine Wasserleitung auf Samos erbaute, zu unterscheiden ist. Dafs die Erneuerung mehrerer Wellenbrecher in Form einer Curve vor der Nordseite und die Unterfahrung des Thurmes stattgefunden hat, wird von Procopios angedeutet, aber über den Neubau der oberen Geschosse nichts erwähnt, sodafs hier eine bedauerliche Lücke klafft, welche schwerlich je mit Sicherheit ergänzt werden kann. Denn nach der im Jahre 641 erfolgten Eroberung durch die Araber erfahren wir durch den Pilgerbericht des Adamnanus, dafs die Beleuchtung für die Schiffer noch dauernd und wohlgeordnet stattfände, dafs aber als Leuchtmaterial Holz- und Faschinenwerk mit Pech getränkt diene.[24]) Daraus folgt mit Sicherheit, dafs die ursprüngliche vortreffliche aber kostbare Beleuchtungsweise mit Steinöl innerhalb einer offenen Laterne aufgegeben und durch die minderwerthige, in Form von brennenden Holzstöfsen, ersetzt war. Daher ist auch die Vermuthung, dafs durch den Bau des Ammonios die oberen Bautheile wesentlich verändert, d. h. vermindert worden sind, als unbedingt sicher anzunehmen.

Von diesem Zeitpunkte — 670 — ab, sind wir auf arabische Quellen angewiesen, welche zwar nicht dürftig fliefsen, aber nur mit grofser Vorsicht gebraucht werden können. Gleichwohl sind dieselben für einen Wiederherstellungsversuch wegen einzelner wichtiger Angaben ganz unentbehrlich.[25])

Einer der ältesten Schriftsteller, Ibn Ḫordādbeh aus Tunis, berichtet um 849 nicht als Ortskenner, sondern nur nach Hörensagen, dafs der Pharos 366 Zimmer und auf seinem Gipfel eine Capelle habe, dafs seine Basis das Meer bespüle und dafs man ihn auf einer Rampe ersteige. Werthvollere Angaben liefert dann Jaʿqūbī[26]) um 891, welcher als Besucher die damalige Höhe angiebt und die Festigkeit rühmt, ohne einer kürzlich stattgefundenen Wiederherstellung zu gedenken. Auch der etwas jüngere Ibn Rosteh — 903 — erwähnt derselben nicht, und doch wird sie durch einen der besten Schriftsteller jener Epoche, Masʿūdī, welcher 956 stirbt — sein erstes Datum ist von 915 —, verbürgt.[27]) Nach einer mit Mafsangaben ausgestatteten Beschreibung des Pharos fährt er fort: „Einmal war einer seiner Pfeiler eingestürzt, und zwar der westliche nach dem Meere zu .... es baute ihn wieder auf Abū'l Ǵaiš Ḫamārūja, der Sohn Aḥmed Ibn Ṭūlūns". Dies mufs, weil der letztere 884 stirbt,

19) Lucian, de histor. conscrib. 62. Aehnlich urtheilt Brunn, a. a. O. II, 256. Anders Letronne, vgl. Lumbroso, Egitto al tempo dei Greci e dei Romani. Roma. 1882. Nr. 163.

20) Judeich, Cäsar im Oriente. 85 u. 91. — Bonamy, Descript. d. la ville Alexandrie in d. Mém. de Litt. 1731—35. p. 416 ff. — Caesar, de bell. civ. Comm. III, 112.

21) Epiphanius monach. ed Dressel. 1843, p. 5 (το πρῶτον θαῦμα).

22) Procopios Gaz. Panegyr. in Imp. Anastasium ed. Migne, LXXXVII, 2818, XX.

23) Anall. III, 229, n. 373 u. Anth. Pal. IX, 674.

24) Paul Geyer, Itinera Hieroslymitana. Wien 1898. Adamnani, De locis sanctis XXX, S. 279.

25) Mahmoud Bey in s. Mém. sur l'antique Alex. hat einige derselben bereits benutzt, dann Vaujany, Botti und Allard a. a. O. S. 8 ff.

26) Bibl. geogr. arab. VII, 338.

27) Bibl. geogr. arab. VIII. 47—48, ed. de Goeje.

etwa um 880 geschehen sein, und diesen Bau, auf den im Abschnitt III zurückzukommen sein wird, beschreibt Masʿūdī eingehend. Er wäre dreitheilig, und der unterste viereckige, sehr hohe Theil bestände aus weifsen, mit Blei vergossenen Steinquadern, während das zweite achteckige, etwa halb so hohe Stockwerk aus Ziegeln und Gips erbaut sei. Eine weite Plattform, auf der man umhergehen könne, umgäbe den Achtecksbau, und der oberste Theil, auf welchen Aḥmed Ibn Ṭūlūn nach erfolgter Ausbesserung eine Qubba aus Holz habe setzen lassen, sei rund und durch eine Rampe ersteigbar. Ein Fortsetzer des Masʿūdī berichtet dann im unmittelbaren Anschlusse, dafs im Ramadan 344 H. = 955 durch ein gewaltiges Erdbeben etwa die Hälfte des oberen Stockwerkes herabgestürzt sei. Von der zweifellos bald darauf erfolgten Wiederherstellung erfahren wir nichts, weil eine fast zweihundertjährige Pause in der litterarischen Ueberlieferung vorliegt.

Es folgt Idrīsī[28]) um 1153, welcher nach einer glänzenden Schilderung von Alexandria auf den Pharos übergeht, indem er als Besucher von ihm sagt: „Hier steht ein Minaret, das nicht seinesgleichen in der Welt hat, sowohl wegen seiner Structur als auch wegen seiner Dauerhaftigkeit, denn abgesehen davon, dafs es aus vortrefflichen Steinen — genannt Kedan — besteht, sind die Blöcke miteinander durch mit Blei vergossene Quadern verbunden und die Fugen so dichtschliessend, dafs das Ganze unzertrennlich ist, obschon die Meereswogen an der Nordseite unaufhörlich an den Bau schlagen.“ Den Thurm beschreibt er wie Masʿūdī als dreitheilig und mit zwei Galerieen versehen, eine um das achteckige und die zweite um das cylindrische Obergeschofs, welches sich nach oben verjüngt. Im Innern und unter der Treppe sind Wohnungen angelegt. Die Höhe giebt er zu 300 Ellen (nach dem Mafse Rashashi) an, jede Elle zu drei Spann. Das Gesamtmafs ist unbrauchbar, weil es 162 m Höhe ergeben würde — 16 m höher als die Pyramide des Chufu — und man als sicher annehmen darf, dafs der Pharos in arabischer Zeit immer rund 85 m Höhe gehabt hat.

Aus der Reisebeschreibung des Benjamin von Tudela — begonnen 1173 — ist nur die Angabe, dafs der Pharos seine Dienste noch thue, nicht ohne Werth, dagegen verdanken wir dem etwas jüngeren Ibn Ǧubair um 1182 sehr wichtige, später zu benutzende Mafsangaben.[29]) Ihm kann Jāqūt, welcher zweimal Alexandria besucht hat, — 1215 und 1227 — als ebenbürtig an die Seite gestellt werden. Er berichtet unter anderem, dafs einer der Tragepfeiler des Thurmes zusammengebrochen, aber durch Melik eṣ-Ṣāliḥ er-Rāziq oder durch einen anderen von den Wesiren der Aegypter erneuert worden sei. Es mufs hier Melik el-ʿĀdil eingesetzt werden, sodafs jene sicherlich wieder recht umfangreiche Wiederherstellung den Jahren von 1193 bis 1213, also der Zeit nach Saladin angehört. Mittelbar bestätigt ʿAbd el-Laṭīf[30]) am Ende des 12. Jahrhunderts aus eigener Wahrnehmung diese Angabe, indem er meldet, dafs er am Meeresufer, da, wo die Stadtmauern herantreten, mehr als vierhundert Säulen — in zwei oder drei Stücke gebrochen — und von gleichem Gesteine wie die Pompejussäule und etwa ein Drittel bis ein Viertel so grofs im Mafsstabe als diese vorgefunden habe, welche ein Statthalter in Saladins Zeitalter hatte zerschlagen lassen, um sie als Schutzmittel gegen den Wellenschlag zu gebrauchen. Hieraus folgt, dafs die von Ammonios erneuerten Wellenbrecher aufs neue untergegangen waren und statt ihrer die Vertheidigung der Klippe, auf welcher der Pharos stand, sowie überhaupt aller Seemauern gegen den Andrang der Wogen in der nothdürftigsten Weise erfolgte.

Unter diesen Umständen ist es daher sehr begreiflich, dafs die Standfestigkeit des Leuchtthurmes immer mehr bedroht wurde. Denn Ibn ʿAbd el-Ḥakam berichtet, dafs zur Zeit Ẓāhir Baibars' — 1200 bis 1277 — einer der Pfeiler wieder einzustürzen drohte, sodafs die sofortige Ausbesserung befohlen wurde, wobei an Stelle der früheren Qubba eine Moschee eingerichtet wurde. Aus den gleichzeitigen Angaben des Qazwīnī — schreibt 1263[31]) — darf man mit Sicherheit schliefsen, dafs der Pharos damals im ganzen die dreitheilige Gestalt — unten quadratisch, dann achteckig und oben rund —, welche dem byzantinischen Erneuerungsbau durch Ammonios entstammte, bewahrt hatte.

Erneute schwere Beschädigungen brachte das sehr oft erwähnte furchtbare Erdbeben von 1303,[32]) welches die ganze Nordküste von Africa verheerte und Alexandria besonders hart traf, aber die nothwendige rasche Hülfe blieb diesmal aus. Erst im Jahre 1324 befahl der Emir Rukn ed-Dīn Baibars eine Wiederherstellung. Indessen war der eingetretene Verfall nicht mehr aufzuhalten, denn als guter Beobachter berichtet Ibn Baṭūṭa,[33]) dafs 1326 eine Seite des Pharos darniederliege. Bei seiner Rückkehr von einer längeren Reise 1349 fand er den Leuchtthurm als traurige Ruine. Ob damals noch eine Beleuchtung stattfand und in welcher Weise, habe ich nicht ermitteln können. Nachdem Qalqašandī 1440 auch die Trümmer des alten Baues gesehen hatte, besuchte der Mameluckensultan Quaït Bey 1477 bis 1478 die Stelle[34]) und befahl daselbst den Aufbau eines festen Schlosses mit vier Eckthürmen und einem Mittelthurme, der ein Leuchtfeuer tragen sollte. Dieser, mit Benutzung der alten Steine rasch durchgeführte Bau kam in zwei Jahren zustande[35]) und hat seitdem alle Wechselfälle, von denen Alexandria, besonders seit der Eroberung des Generals Bonaparte 1798 bis zu der barbarischen Beschiefsung der Stadt durch die Engländer 1882, betroffen worden ist, mitgemacht.[36]) Daher bildet das mit Wällen und Mauern umgebene Fort Quaït Bey jetzt eine im raschen Verfalle begriffene Ruine, von welcher die beiden Text-Abb. 1 und 2 eine Vorstellung geben.[37])

28) Recueil de Voyages et de Mém. publ. par l. Soc. de Géographie T. V. u. VI. Paris 1836 u. 1840. Uebers. v. Jaubert V, 297 ff.

29) W. Wright, The travels of Ibn Gubair S. 37.

30) ʿAbd el-Laṭīf. Rélation de l'Egypte trad. p. Sylvestre de Sacy. I, 182 f.

31) Qazwīnī, Kitāb ʿaǧāib al maḫlūqāt. ed. Wüstenfeld II, S. 90.

32) Ibn Ijās, Chronik v. Aegypten I, S. 146.

33) Ibn-Baṭūṭa, (Reise des Scheikh), Übers. v. M. Cherbonneau. Paris 1852. S. 18 ff.

34) Ibn-Ijās II, S. 173.

35) Ibn-Ijās II, S. 189.

36) H. de Vaujany. Récherches sur les anciens monuments. Paris 1888, S. 30 ff.

37) Die Abbildungen habe ich nach kleinen Photographieen gezeichnet, welche mein alter Freund Prof. Jakobsthal im Winter 1899 bis 1900 auf meine Bitte aufgenommen hatte.

II. Vorhandene Grundlagen für die Wiederherstellung.

Dieselben sind litterarischer und monumentaler Natur. Zu den ersteren gehören sowohl klassische wie arabische Quellen. Die griechisch-römische Ueberlieferung ist leider sehr lückenhaft, während die arabische von phantastischen Uebertreibungen sich nicht frei gehalten hat. Für die Gesamtauffassung des Bauwerkes liefern antike Denkmäler, und zwar neben den Reliefs besonders die in römischer Zeit geschlagenen Erzmünzen von Alexandria, zuverlässige Stützpunkte. Mit beider Hülfe läſst sich durch richtige Verwerthung der von den arabischen Schriftstellern geretteten Maſse und wichtigen Einzelheiten ein angenähert sicheres Bild des untergegangenen Wunderwerkes gewinnen.

Aus der klassischen Litteratur ist Strabos[38]) Bericht der älteste und werthvollste: „Die Pharos ist ein längliches Inselchen, ganz nahe am Festlande, mit diesem einen Hafen mit zwei Einfahrten bildend. Der Strand nämlich ist eingebuchtet, zwei Vorsprünge hinaussendend. Zwischen diesen liegt die Insel, die Bucht schlieſsend, denn sie ist ihr der Länge nach vorgelagert. Von den Ausläufern der Pharos tritt der östliche näher an das Festland und seinen Vorsprung heran (dieser heiſst Lochias) und macht die Einfahrt eng. Zu der Enge der Einfahrt kommen noch Klippen, theils unter, theils über dem Wasser, welche zu jeder Zeit den aus dem offenen Meere andringenden Wogenschwall steigern. Es bildet aber auch den Ausläufer des Inselchens selbst ein wogenumbrandeter Fels mit einem wunderbar aufgeführten vielstöckigen Thurme, der denselben Namen trägt wie die Insel. Diesen erbaute der Knidier Sostratos, ein Freund der Könige, wie die Inschrift sagt. Denn da die Küste zu beiden Seiten hafenlos und flach ist, auch Klippen und Untiefen besitzt, bedurfte es im Interesse der vom hohen Meere Heransegelnden eines hohen und leuchtenden Zeichens, damit sie den Eingang zum Hafen sicher finden konnten. Auch die westliche Einfahrt ist nicht gefahrlos, bedarf jedoch nicht so groſser Vorsicht.“

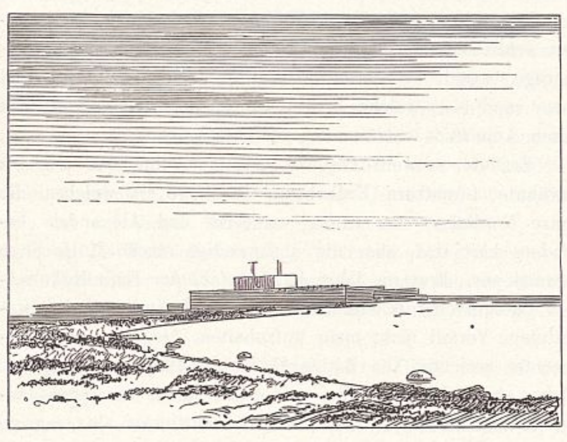


Abb. 1.

Hierzu liefern Cäsar (Hirtius) und Lucanus einige Ergänzungen, insofern die cäsarische Berichterstattung[39]) neben der groſsen Höhe und bewundernswürdigen Technik des Thurmes *(turris magna altitudine, mirificis operibus exstructa)* seine fortificatorische Wichtigkeit als Schlüssel des Kriegshafens erkennen läſst und Lucans Verse[40]) einerseits die Hafensperrung durch eiserne Ketten bestätigen und anderseits auf eine ruhige und gleichmäſsige Beleuchtungsweise hindeuten.

„*Septima nox zephyro nunquam laxante rudentes*
Ostendit Phariis Aegyptia littora flammis
Sed prius orta dies nocturnam lampada texit
Quam tutas intraret aquas . . . . . .“

Die letztere Annahme darf auch aus Plinius[41]) Worten: „*Periculum in continuatione ignium ne sidus existumetur, quoniam e longinquo similis flammarum adspectus est*“ geschlossen werden, und die Verse des Statius[42])

„. . . . *Bacchei vineta madentia Gauri*
Teleboumque domos, trepidis ubi dulcia nautis
Lumina noctivagae tollit Pharos aemula Lunae“

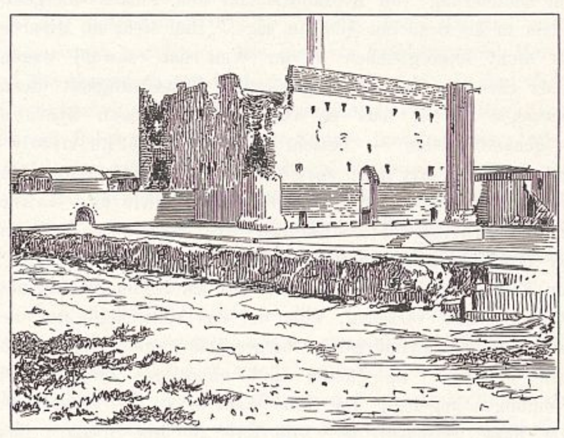


Abb. 2.

liefern eine weitere Bestätigung, obschon sie sich nicht auf das Leuchtfeuer von Alexandria, sondern auf die in Italien entstandenen Nachbildungen desselben in Capreae[43]) (Capri) und Puteoli (Puzzuoli) im Golfe von Neapel beziehen. Man hatte Form, Beleuchtungsweise und Namen auf die Leuchtthürme Campaniens bereits im ersten Jahrhundert n. Chr. erfolgreich übertragen.

Von besonderer Wichtigkeit ist sodann die Angabe des Josephus,[44]) welche lautet: „Dieses Inselchen (die Pharos) ist von hohen künstlichen Dämmen umgeben, an welche das wogende Meer schlägt“, weil nur aus dieser Stelle die Thatsache zu erfahren ist, daſs im ersten Jahrhundert n. Chr. vor der Nordseite groſse Wellenbrecher bestanden, die aus der Ptolemäerzeit stammten.

Mehrfach betont Lucian die seltenen Vorzüge des von ihm selbst gesehenen Pharos. In der oben (S. 175 Fuſsnote [19]) angeführten Schrift nennt er ihn „eines der gröſsten und herrlichsten Werke der Welt.“ Im Icaromenippus benutzt er in toller Uebertreibung den Koloſs von Rhodos und

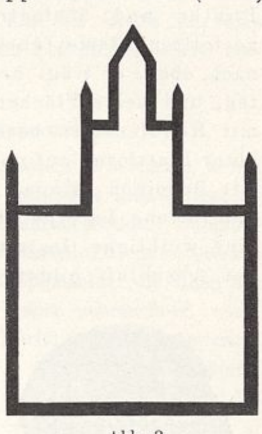
38) Strabo XVII, cap. I, 6 pag. 673 Didot.
39) Caesar, de bell. civ. Comm. III, 112 u. bell. Alex.
40) Lucan, Pharsalia ed. Francken. X, 57 und IX, 1004.
41) Plinius XXXVI, 12, 18.
42) Statius, Silvae III, 5, 99.
43) Suetonius, Tiberius c. 20.
44) Josephus, Bell. Jud. IV. cap. 10, 5.

den Pharos von Alexandria als Mafsstab, um an diesen „alles andere überragenden Werken“ die Erde wieder zu erkennen. Leider hat er sich der von Plinius[45]) für die gröfste Pyramide bei Memphis mitgetheilten Mafse bei dieser Gelegenheit nicht erinnert. Aus Herodian[46]) erfahren wir bei Beschreibung des Katafalkes von Septimius Severus, dafs diese Scheiterhaufen für die Kaiser in ihrem stufenförmigen Aufbau den Pharen in den Seehäfen glichen. Sodann nennt Ammianus Marcellinus[47]) den Pharos „*turris excelsa*“, aber nachdem er kurz vorher die Pyramiden als „*ultra omnem omnino altitudinem, quae humana manu confici potest, erectae turres*“ charakterisirt hat. Der Letzte endlich — Ausonius[48]) — nennt ihn, vielleicht aus metrischen Gründen, den Memphitischen Thurm ohne jeden Zusatz.

Unter den arabischen Ueberlieferungen ist Masʿūdīs Beschreibung[49]) eine der wichtigsten: „Der Leuchtthurm ist eins der Weltwunder.[50]) Ihn erbaute einer der Ptolemäer; dies waren griechische Könige nach dem Tode Alexanders. Wegen der zwischen ihnen und den römischen Königen stattfindenden Land- und Seekriege machten sie diesen Leuchtthurm zur Wachtstation. Auf seiner höchsten Spitze befand sich ein gewaltiger Spiegel, nach Art von durchsichtigen Steinen, in welchem man die Seeschiffe sehen konnte, wenn sie vom römischen Gebiete herauskamen, auf eine Entfernung, in der sie für die Augen noch unerreichbar waren.“ Es folgt dann die oben mitgetheilte Beschreibung mit Mafsen und dem wichtigen Zusatze, dafs an der Ostseite eine Inschrift in griechischen Buchstaben in Blei eingelassen sei und zwar in beträchtlicher Höhe über dem Erdboden. Trotzdem habe das Meer schon oft ihren Fufs erreicht. Da er die Höhe der Buchstaben und ihre Entfernung von einander angiebt, mufs die Inschrift für ihn erreichbar gewesen und von ihm gemessen worden sein.

Nach Jāqūt[51]) ist er (der Pharos) „eine hohe Burg auf dem Grate eines im Meere sich erhebenden Berges am Rande einer Insel, welche sich im Hafen von Alexandria befindet; von ihr zu dem Festlande ist es ungefähr eine Pfeilschufsweite. Man kann zu ihr nur über das Wasser des Salzmeeres gelangen. Auch hörte ich, dafs das Trinkwasser von einer seiner Seiten zu ihm hineingeleitet wird. Der Leuchtthurm ist ein viereckiges Gebäude und hat eine breite Treppe, auf der ein Reiter zu Pferde hinaufsteigen kann. Diese Treppe ist gedeckt mit grofsen Steinen, welche auf den Umfassungsmauern auflagern. Man steigt hinauf zu einem hohen Stockwerke, von dem man das Meer mit Zinnen beherrscht. Dieser Absatz umgiebt einen zweiten Bau, welcher aussieht wie eine zweite Burg, in der man auf anderen Stufen zu einem höheren Orte emporsteigt, von dem man die erste Plattform mit neuen Zinnen beherrscht. Hier erhebt sich eine Qubba, welche aussieht wie die Qubba einer Schildwache. Dies ist seine (des Leuchtthurmes) Gestalt“ (Text-Abb. 3).

„Nicht befinden sich in ihm, wie gesagt wird, viele grofse Säle und weite Wohnungen, in denen sich der Fremde verirren könne, sondern die Treppe dreht sich (blofs) um ein leeres Etwas, wie ein Brunnen, von dem sie behaupten, dafs es verderblich sei und dafs man, wenn man etwas hineinwerfe, nicht wisse, wo es zu liegen komme und nicht weifs ich es, Gott weifs es am besten.“ Zuletzt versichert er, den Ort aufgesucht zu haben, wo der berühmte Spiegel einst gestanden, aber keine Spur von demselben sei mehr zu sehen. „Solches habe ich festgestellt und alles, was abweichend davon erzählt wird, ist grundlose Lüge.“


Abb. 3.

Der Scheikh Ibn-Baṭūṭa,[52]) der zweimal am Platze war, sagt folgendes: „Seine Form ist die eines quadratischen Thurmes, der in die Lüfte aufstrebt. Er hat nur ein Thor, aber da dieses über dem Boden hoch erhoben ist, so hat man in der Front und auf gleiche Höhe ein Mauerwerk aufgeführt (offenbar eine Rampe oder Treppe), auf welchem man nach Bedarf die Planken gleiten lassen kann, um den Verkehr nach aufsen zu erleichtern. Im Innern sind mehrere Wohnungen eingerichtet, diejenige unter anderen, die dem Thore am nächsten liegt, dient dem Wächter als Quartier.“ Bestätigend meldet Ibn al Mustawag bei Sujūṭī:[53]) „Die untere Hälfte betritt man heute durch das Leuchtthurmthor; dasselbe liegt 20 Ellen über dem Erdboden, man betritt es über Arcaden, aus geschnitten Steinen erbaut.“ Abgesehen von den noch zu verwerthenden Mafsangaben im nächsten Abschnitte sind hiermit die litterarischen Quellen erschöpft.

Von den monumentalen Quellen stehen die Erzmünzen von Alexandria, welche, von Domitian bis Commodus reichend, die Zeit von 95 bis 190 n. Chr. umfassen, an der Spitze. Man hat drei verschiedene Typen unterschieden,[54]) die vielleicht noch vermehrt werden können, weil es in den gröfseren Münzsammlungen von London, Paris und Berlin an guten Exemplaren nicht fehlt.[55]) Die Text-Abb. 4 bis 8 veranschaulichen diese Typen. Ihre überwiegende Mehrzahl zeigt die raschen Schrittes nach rechts eilende Isis Pharia, mit den Händen ein geblähtes Segel haltend und vor ihr stehend der über Eck gezeichnete Pharos als Typus 1. Eine etwas kleinere Münze, Text-Abb. 7, stellt den zweiten Typus dar: Pharos links und ein abfahrendes Handelsschiff rechts, und eine zwischen beiden die Mitte haltende Münze, Text-Abb. 8, läfst den dritten Typus erkennen; Pharos in sehr viel gedrungeneren Verhältnissen, allein, ohne Nebenbild.

45) Plinius XXXVI, 12, 17.
46) Herodian II, 4.
47) Ammianus Marcell. XXII, 15, 28 und 16, 9.
48) Ausonius, Mosella v. 330.
49) Bibl. geogr. arab. VIII, 47—48.
50) Die Araber kennen nicht sieben, sondern nur vier Weltwunder. (Bibl. geogr. arab. VIII, 144.)
51) Jāqūt ed. Wüstenfeld I 263, mit Umrifs-Skizze.
52) Ibn Baṭūta a. a. O. S. 18 ff.
53) Sujūṭī, Ḥusn al muḥāḍara. ed. Kairo. 1299 (H.). 1881.
54) Reg. Stuart Pool, Catal. of Greek coins Alexandria in the Brit. Mus.
55) Die Abgüsse zu den Text-Abb. 4 bis 6 u. 7 verdanke ich der Güte des Münzcabinet-Directors im Brit. Mus. Mr. Hill; die entsprechenden zu der Text-Abb. 8 der Fürsorge des Herrn Dir. Prof. Dr. Dressel hierselbst.

Auf allen Reversen zu 1. und 2. ist der Bau ebenso charaktervoll wie übereinstimmend abgebildet worden, nämlich als hoher schlanker Thurm mit stark geböschter Plinthe und Stufentreppe, die zu einer hochgestellten Pforte führt. Der Thurm verjüngt sich nach oben, er trägt breite Ecklesinen an den Kanten, und seine Flächen sind in 3 bis 5 Geschossen mit Rundfenstern besetzt. Oben schliefst er mit einer Plattform, auf deren Ecken blasende Tritonen mit Buccinen gelagert sind, während in der Mitte eine offene Laterne sich erhebt, auf deren Gipfel eine weibliche Gestalt mit Scepter in der Linken den Abschlufs bildet. Dafs in der unteren Figur die



Abb. 4. Abb. 5.

Abb. 7.

Abb. 6. Abb. 8.

Isis Pharia dargestellt ist, lehrt das Sistrum, welches sie — unbeschadet des Segelfassens — in der rechten Hand hält, und daher darf man mit Reginald Pool wohl als sicher annehmen, dafs dieselbe Göttin als kolossales Erzstandbild den Bau krönte. Die kleinen Abweichungen in den Verhältnissen und in der Lage der Treppe sind ohne Bedeutung. Dagegen ist in architektonischer Beziehung die Thatsache wichtig, dafs die Stempelschneider den Thurm nicht abgestuft dargestellt haben, weil sie beweist, dafs die sicher vorhanden gewesenen Absätze nur schmale Umgänge gebildet haben können. Weil diese bei dem Umbau des Ammonios im Anfange des 6. Jahrhunderts n. Chr. unter starker Verminderung des Ganzen durch breite Plattformen ersetzt wurden, folgt die Nothwendigkeit, bei jedem Wiederherstellungsversuche die Innenmauern so anzuordnen, dafs der Aufbau zweier hohen Geschosse (eines achteckigen und eines runden) über dem alten Unterbau statisch möglich wird. Ferner ergiebt sich, dafs Herodians Vergleich zwischen den Pharosbauten und den kaiserlichen Scheiterhaufen nur einen bedingten Werth hat, wie Text-Abb. 9, welche eine gut erhaltene Consecrationsmünze auf Mark Aurel des Berliner Münzcabinets[56]) in doppelter Gröfse wiedergiebt, deutlich beweist. Die breiten Absätze des Rogus lehren unzweifelhaft, dafs das Vorbild für ihn nicht im Pharos von Alexandria, sondern in der Pyra des Hephästion in Babylon zu

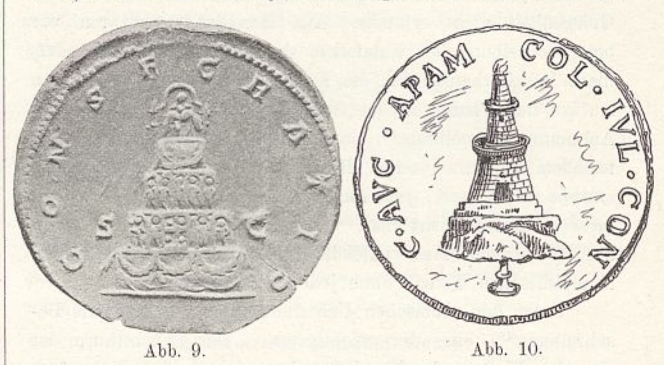


Abb. 9. Abb. 10.

suchen ist. Deinokrates' vergängliche Schöpfung hat Jahrhunderte hindurch — zuletzt in Rom — fortgewirkt. Zur Ergänzung diene noch Text-Abb. 10, eine Münze von Apamea (Bithynien) mit einem dreigeschossigen Pharos, dessen runde Basis der gröfseren Standfestigkeit halber nach unten sehr stark verbreitert ist.[57])

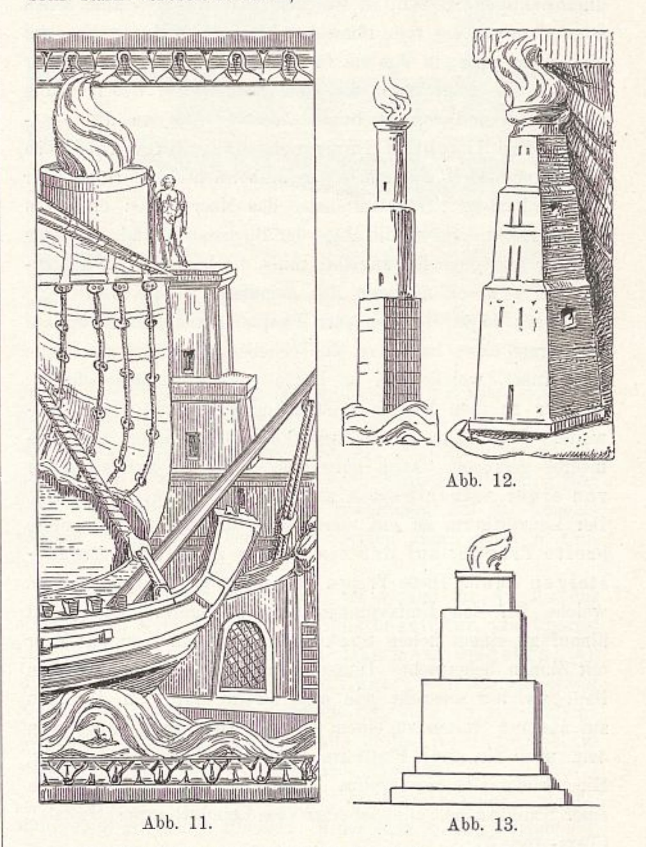


Abb. 12.

Abb. 11. Abb. 13.

Ungleich lehrreicher ist die Darstellung des Pharos von Ostia, auf dem bekannten Torloniarelief aus Terracina,[58])

56) Auch dieser Beitrag wird der Güte des Herrn Direct. Prof. Dr. Dressel verdankt.

57) Aus Allard a. a. O. S. 17 entlehnt.

58) Guglielmotti: Delle due navi romane. Roma 1866. Aus dem schönen Kupferstiche, welchen mir mein Schwager Prof. Dr. Michaelis zur Verfügung stellte, habe ich nur das für meinen Zweck Nothwendigste entlehnt.

weil Suetonius meldet, dafs dieser von Claudius errichtete Bau eine Nachbildung des Pharos von Alexandria war.[59]) Text-Abb. 11 veranschaulicht den fünfgeschossigen Thurm, dessen Absätze stark übertrieben worden sind, während die Verjüngung der Mauern und die Hervorhebung der Kanten durch breite Lesinen — genau wie auf den Münzen von Alexandria — das Urbild deutlich erkennen lassen. Allerdings sind auch Unterschiede vorhanden: Das oberste Geschofs ist ein Cylinder und die Laterne nebst der krönenden Bildsäule fehlt. Ihre Stelle nimmt ein offenes, mächtig lohendes Feuer ein, sodafs auf die Verwendung von Holzstöfsen in Ostia geschlossen werden könnte, wenn man eine so minderwerthige Beleuchtungsweise für den nächsten Hafen von Rom nicht beanstanden müfste. Vermuthlich brannte hier Steinöl oder Pissasphaltus in offenen Becken. In dieser Beziehung liefert uns ein schöner pentelischer Marmorsarkophag aus Rom,[60]) dessen Vorderseite mit den Reliefgestalten der Stadt Alexandria und der Insel Pharos geschmückt ist und dessen linke Ecke Text-Abb. 12 rechts vorführt, noch eine wesentliche Ergänzung für das Urbild, denn dieser dreistufige, geböschte und mit vielen Schlitzöffnungen versehene Thurm trägt oben ein lohendes Feuer, welches durch das riesige Becken, in welchem es brennt, die Annahme gestattet, dafs in Alexandria nicht pechbeträufelte Holzkloben oder Faschinenbündel gebrannt haben, sondern dafs eine Flüssigkeit als Leuchtstoff verwandt wurde. Die beiden Holzschnitte, Text-Abb. 12 links, von einem Sarkophage aus Ny Karlsborg, und Text-Abb. 13, von einem Relief aus Museo Chiaramonti (gall. lapid. compart. VIII, Fensternische) entnommen, verdienen nur insofern Beachtung, als sie die schlichteste Fassung des weit verbreiteten Typus vorführen.[61])

Allard, in seinem oben bereits gerühmten Werke: *Les Phares*, hat zwei der späteren römischen Pharen, den sogenannten Thurm des Hercules in Gallizien bei Ferrol und den von Gessoriacum = Boulogne sur mer, S. 27 und 31, abgebildet und erläutert. Der Holzschnitt Text-Abb. 14 ist seinem Werke entlehnt und beruht auf einer Zeichnung der Bibliothek in Boulogne. Der Thurm war achteckig, besafs zwölf Stockwerke mit anderthalbfüfsigen Absätzen, und jedes Geschofs hatte nach Süden eine grofse Thür. Nach Suetonius hatte ihn Caligula erbaut und Claudius vollendet; er bestand aus Kalksteinen und Ziegeln. Während der Völkerwanderung verfallen, hatte ihn Karl der Grofse im Jahre 811 ausbessern und das nächtliche Leuchtfeuer wieder entzünden lassen.[62])

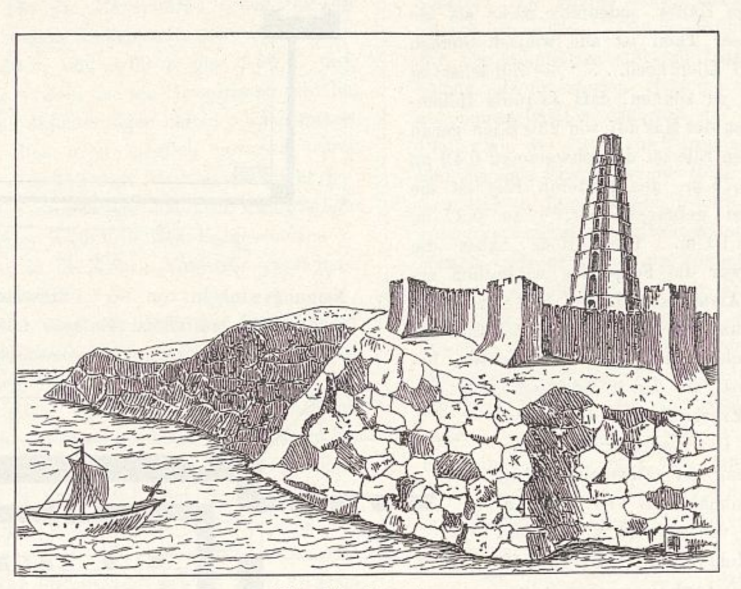
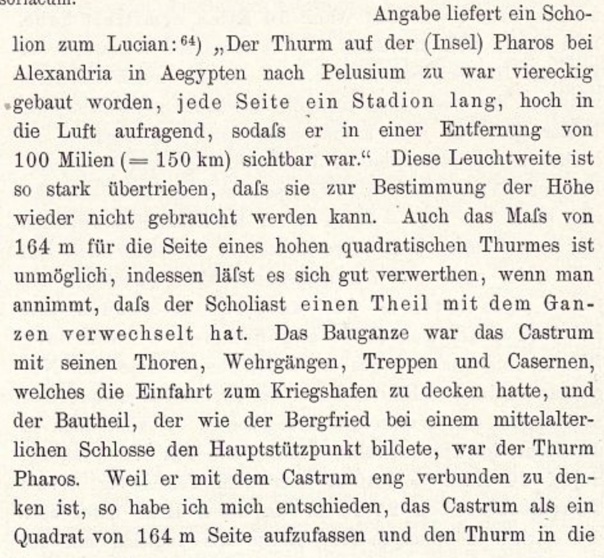


Abb. 14. Gessoriacum.

III. Wiederherstellungsversuch.

Jeder Versuch einer zeichnerischen Wiedergabe bedarf des Anschlusses an einigermafsen gesicherte Mafse, sonst ist und bleibt er ein werthloses Phantasiegebilde. Unmittelbare Mafsangaben sind in der klassischen Litteratur überaus selten. Die jüngste derselben bei Epiphanius: die Höhe des Pharos betrage 306 orgyien, ist leider unbrauchbar, wenn sie wörtlich verwerthet wird.[63]) Dürfte man als Einheitsmafs statt Klafter Fufs setzen, so erhielte man das Mafs von 100,36 m und unter der weiteren Annahme, dafs der bischöfliche Verfasser von der Thorschwelle ab gerechnet habe, noch ein Mehr von 7,40 m, also 107,76 m als Feuerhöhe über dem Erdboden, was mit meiner Ermittlung sehr gut stimmen würde. Aber weil jene Aenderung und diese Annahme den Charakter des Gewaltsamen besitzen, so ist es besser auf die Stelle zu verzichten. Eine zweite Angabe liefert ein Scholion zum Lucian:[64]) „Der Thurm auf der (Insel) Pharos bei Alexandria in Aegypten nach Pelusium zu war viereckig gebaut worden, jede Seite ein Stadion lang, hoch in die Luft aufragend, sodafs er in einer Entfernung von 100 Milien (= 150 km) sichtbar war.“ Diese Leuchtweite ist so stark übertrieben, dafs sie zur Bestimmung der Höhe wieder nicht gebraucht werden kann. Auch das Mafs von 164 m für die Seite eines hohen quadratischen Thurmes ist unmöglich, indessen läfst es sich gut verwerthen, wenn man annimmt, dafs der Scholiast einen Theil mit dem Ganzen verwechselt hat. Das Bauganze war das Castrum mit seinen Thoren, Wehrgängen, Treppen und Casernen, welches die Einfahrt zum Kriegshafen zu decken hatte, und der Bautheil, der wie der Bergfried bei einem mittelalterlichen Schlosse den Hauptstützpunkt bildete, war der Thurm Pharos. Weil er mit dem Castrum eng verbunden zu denken ist, so habe ich mich entschieden, das Castrum als ein Quadrat von 164 m Seite aufzufassen und den Thurm in die



59) Suetonius, Claudius c. 20.

60) Bullet. d. commiss. archeol. commun. d. Roma. 1877. Tav. XVIII—XIX.

61) Die Text-Abb. 12 u. 13 verdanke ich der Güte der Herren Prof. Dr. Robert (Halle) und Petersen (Rom).

62) Einhard, Annales ad a. 811.

63) Die Angabe des Epiphanius hat schon Allard a. a. O. S. 8 zu verbessern gesucht und hat sich mit einer Höhe von 66 bis 70 m begnügt.

64) Schol. Lucian, Icaromen. 47, 1. Jacobitz.

Mitte seiner Nordwestmauer zu stellen, wie dies der kleine Lageplan Text-Abb. 15 erkennen läfst. Wegen der ganz getrennten Stellung des Thurmes auf einer Klippe mufs das von der Insel aus zu erreichende Eingangsthor des Castells in Form eines Propugnaculum in der Westmauer angenommen werden.

Ungleich schwieriger ist die Ermittlung der ursprünglichen Grundmafse des Pharos. Auszugehen ist dafür von den Angaben bei Ibn Ali Ja'qūbī, Mas'ūdī und Ibn Ǵubair. Der erstere sagt im Jahre 891:[65]) „Der Thurm ist fest und stark, seine Höhe beträgt 175 Ellen, auf ihm befinden sich Feuerstätten usw." Der zweite berichtet:[66]) „Die Höhe ist etwa 230 Ellen, früher war sie 400 Ellen, doch haben Erdbeben und Regengüsse sie verändert.... Der Bau ist dreifacher Gestalt, beinahe die Hälfte, jedenfalls mehr als ein Drittel, ist viereckig; dieser Theil ist aus weifsen Steinen erbaut und annähernd 110 Ellen hoch...." — Zunächst ist es erfreulich, hervorheben zu können, dafs Ja'qūbīs Höhenmafs von 175 Ellen mit dem des Mas'ūdī von 230 Ellen genau übereinstimmt. Des ersteren Elle ist die schwarze zu 0,49 m, folglich 175 × 0,49 = 85,75 m, des letzteren Elle ist die kleine, welche auch Idrisi gebraucht hat,[67]) zu 0,37 m, folglich 230 × 0,37 = 85,10 m. Diese Höhe haben die Araber vorgefunden, sie war die Folge des wesentlich erniedrigten Umbaues durch Ammonios. Daher darf man, ohne auf die frühere Ueberlieferung bei Mas'ūdī allzuviel Gewicht zu legen, den Schlufs ziehen, dafs der Sostratos-Bau beträchtlich höher gewesen ist, als der byzantinische. Als ein zweites wichtiges Ergebnifs darf die Höhenbestimmung des antiken Unterbaues gelten, den Ammonios bei der Abtragung der Obertheile stehen gelassen hatte. Mas'ūdīs (annähernd) 110 Ellen ergeben zu 0,37 m eine Höhe von etwa 40 m über dem Felsen. Hierzu tritt die Meldung des Ibn Ǵubair,[68]) dafs er die Breite des Unterbaues selbst gemessen und zwar auf über 50 Ellen ermittelt habe. Dies kann, weil die Basis des Thurmes seit früharabischer Zeit mit Häusern besetzt war, nur auf der ersten Plattform zwischen den oben erwähnten Zinnenwänden geschehen sein. Leider giebt er sein Einheitsmafs nicht an, aber es ist höchstwahrscheinlich die im 12. Jahrh. allgemein bevorzugte Elle zu 0,37 m gewesen. Wird solches eingeführt, so erhält man etwa 52 × 0,37 = 19,94 m für das lichte Mafs zwischen den Brustwehren. Als ihre Dicke ist in dieser Zeit auf jeder Seite noch 1 m hinzuzusetzen, sodafs schliefslich die obere Quadratseite des antiken Unterbaues mit rund 22 m als gesichert angenommen werden darf. Werden nun von hier aus die Seiten des Thurmes mit Neigungswinkeln, welche denen auf den Erzmünzen entsprechen, nach unten sich erweiternd herabgezogen, so erhält man in der Höhe der Thorschwelle, welche nach Ibn Mustawag bei Sujūtī 20 Ellen = 7,40 m über dem Felsen lag, eine Thurmbreite von 25,20 m. In dieser Höhe liefen aber die starken Böschungen der Thurmbasis zugleich mit der äufseren Freitreppe aus, wie solches die Münzen unzweifelhaft beweisen. Es ist daher nothwendig, diese Böschungen nach unten hin noch anzusetzen und zwar unter den üblichen

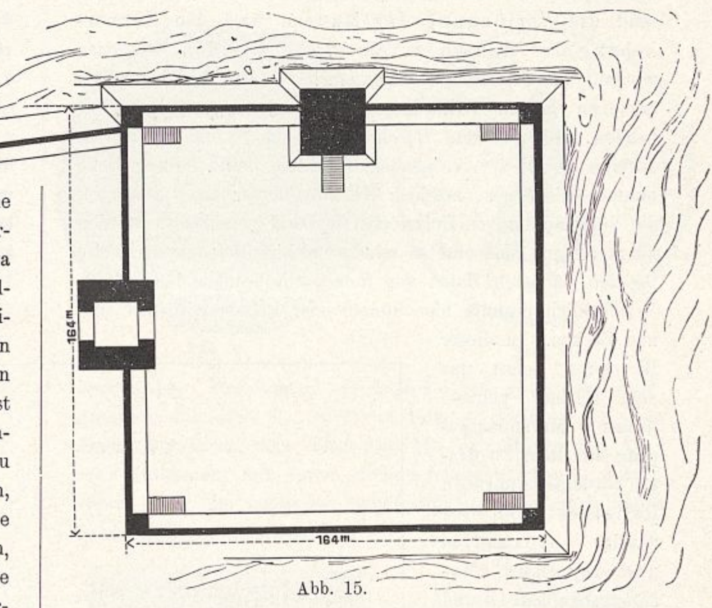


Abb. 15.

Neigungswinkeln von 60°. Geschieht dies, so kommt ungesucht das auffallend einfache Längenmafs von 32,80 m = 100 gr. Fufs für das Grundquadrat zustande. Dafs

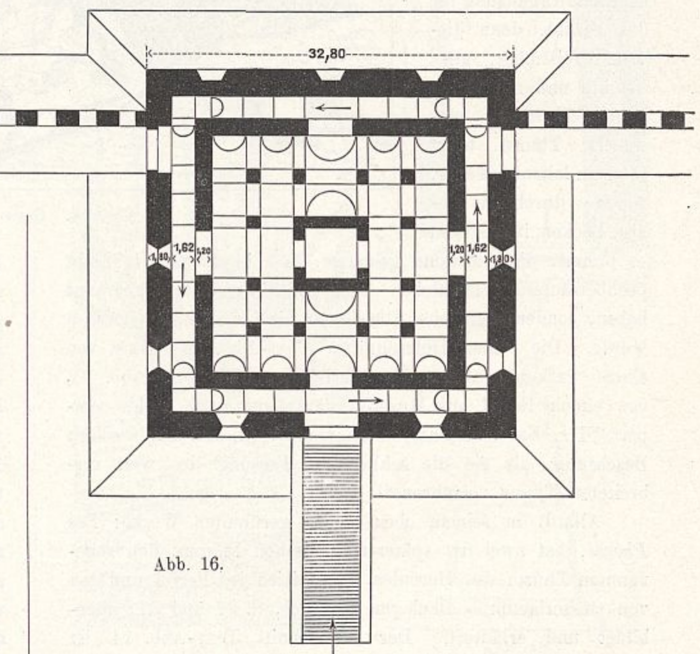


Abb. 16.

die hellenistischen Architekten solche einfachen Grundmafse gern bevorzugt haben, steht durch die oben genannten Bauten des Deinokrates in Susa und Babylon fest, auch das besprochene Scholion zum Lucian, wenn auch irrthümlich verwendet, liefert dafür einen guten Beitrag. Wenn daher die Annahme, dafs Sostratos für seinen Pharos ein Quadratplethron als Basismafs gewählt hat, sehr viel Wahrscheinlichkeit besitzt, so ist es doch schliefslich beson-

65) Bibl. geogr. arab. VII, 338.
66) Desgl. VIII, 47—48.
67) Botti, Fouilles à la Colonne Théodosienne 1896.
68) Wright a. a. O. S. 37.

ders erfreulich, eine volle Gewifsheit über diesen Punkt durch eine Angabe des Ibn Baṭûṭa zu erlangen. Leider habe ich dieselbe erst kennen gelernt, nachdem meine Zeichnungen fertig und zum Stich gegeben waren. Als dieser Scheikh 1326 den Pharos besuchte, waren infolge des vorgeschrittenen Verfalles die kleinen Häuser am Fufse verschwunden und die Böschungen schon so mit Schutt bedeckt, dafs er in Thorschwellenhöhe messen konnte. Daher meldet er: „Jede Seite dieser Construction mifst 140 Spannen in Länge, die Dicke der Mauer mifst 10 Spannen und der verbleibende Raum im Innern (d. i. die gestufte Rampe in der Mauerdicke, die nach oben führte) hat 9 Spannen.“ Weil die Spannbreite durchschnittlich 0,18 m beträgt, so erhält man 140 × 0,18 = 25,20 m, welches das von mir oben ermittelte Mafs der Thurmbreite in Schwellenhöhe ist. Für die Mauerstärke sowie für die Rampenbreite habe ich wegen Unkenntnifs der oben angezogenen Stelle statt 1,80 m und 1,62 m nur 1,50 m und 1 m angenommen, sodafs sowohl in den Grundrissen wie im Durchschnitte noch kleine Abänderungen hätten vorgenommen werden müssen, wenn dies noch möglich gewesen wäre. Die äufsere Gestaltung des Thurmes wird davon nicht betroffen. Im Interesse der Sache füge ich aber nachträglich den neuen und verbesserten Grundrifs des Erdgeschosses in Text-Abb. 16 hinzu, der in demselben Mafsstabe gezeichnet wurde, wie Abb. 2 auf Blatt 20.

Unmittelbare Angaben über die Höhe des Leuchtfeuers über dem Meere in klassischer Zeit fehlen, nur Josephus gewährt eine bescheidene Hülfe.[69]) Zwei von den in der Fufsnote genannten Stellen verdienen keine Erörterung, weil aus keiner derselben ein absolutes Mafs zu gewinnen ist. Die relativ werthvollste ist die erste; sie lautet: „Der linke Theil des Kriegshafens wird durch hohe Ringmauern geschlossen, auf der rechten Seite schützt ihn die Insel mit einem sehr hohen Thurme, welcher den Seeleuten auf 300 Stadien leuchtet, damit sie usw.“ 300 Stadien (jedes zu 164 m gerechnet) sind rund 48 km. Wenn auf Grund dieser Entfernung mit Vernachlässigung der Strahlenbrechung und unter der Annahme, dafs der Horizont des Seefahrers 5 bis 7 m über dem Wasser liegt, rein geometrisch die Höhe des Leuchtfeuers berechnet wird, so erhält man bei 7 m Horizont 116 m und bei 5 m Horizont 125 m Höhe. Bei gröfserer Nähe des Beobachters, etwa 41 km, treten 78 m bezw. 85,3 m ein.[70]) Weil aber, wie oben nachgewiesen, der von den Arabern vorgefundene Bau 85 m gehabt hat und der alte Sostratos-Bau sicher sehr viel höher gewesen ist (*turris excelsa* bei Ammianus), so habe ich die Feuerhöhe auf 110,7 m über See angenommen. Dies ist aber nahezu dasselbe Mafs, welches auch Mahmoud Pascha, Hofastronom des Vicekönigs Ismael Pascha und verdienstvoller Forscher auf dem Boden des antiken Alexandria, schon 1872 ermittelt hat.[71]) Der Vergleichung halber bemerke ich noch, dafs die höchste Spitze der Kuppel des Reichstagshauses genau 110,05 m beträgt.

Nicht unmöglich, ja sehr wahrscheinlich ist es, dafs die Laterne ein Zusatz aus etwas späterer Zeit war und durch die Fortschritte der angewandten Mathematik, welche Ctesibios und Heron (namentlich der letztere) erzielten, zusammengehangen hat. Der spätere Aufbau der Laterne und die bequemere Anordnung des Feuerbeckens in Gestalt einer riesigen Lampe, machten keine Schwierigkeit, weil die Mauern des Unterbaues beides gestatteten. Damals sind wohl auch die Tritonen hinzugefügt und der Spiegel, auf den ich noch zurückkommen werde, aufgestellt worden.

Auf Grund dieser Untersuchungen und Feststellungen ist auf Blatt 20 Abb. 1 im möglichst engen Anschlusse an die Alexandrinischen Münzen das Aeufsere und zwar die Südfront des Pharos nebst den Wehrgängen des Castrum gezeichnet worden. Das Feuerbecken sowie die quadratische, auf vier Eckpfeilern stehende Laterne sind der starken Hitze halber aus feuerfestem Gesteine (Basalt oder Basaltlava) angenommen worden, während die unteren Aufsenmauern und Pfeiler wie wir wissen aus Turrastein bestanden. Das Erzstandbild der Isis Pharia hat die Höhe von 6 m erhalten. Wie der Grundrifs auf Blatt 21 Abb. 6 lehrt, ist auf der Plattform Raum genug vorhanden, um mittels schmaler Steintreppen das Feuerbecken bequem füllen zu können. Auf der Steinbrüstung daselbst wurden an den vier Ecken die von den Münzen verbürgten Tritonen angeordnet. Als Decorationsstücke dürfen dieselben nicht gelten; ich nehme vielmehr an, dafs sie zu akustischen Signalen bei Nebel benutzt wurden. Die Theilung des Thurmes in vier Stockwerke mit schmalen Absätzen, vielen Rundfenstern, einigen Thüren und breiten Ecklesinen ergab sich aus ästhetischen und praktischen Gründen von selbst; für die wuchtigen Gurtgesimse lieferte das Torloniarelief und für die breiten Ecklesinen die altpersischen Feuerthürme sichere Anhaltspunkte.

Der unter der Façade Blatt 20 befindliche Grundrifs, Abb. 2, zeigt die äufsere Freitreppe zum Erdgeschosse sowie die in der dicken Aufsenmauer angeordnete spiralförmig emporsteigende Treppe zu den Obergeschossen, die Seitenpforten nach den Wehrgängen sowie die Pfeiler und Mauerstellung des ebenso wie alle anderen Stockwerke mit Längstonnen überdeckten Erdgeschosses.

Das Blatt 21 Abb. 1 veranschaulicht den Querschnitt von Westen nach Osten und die Grundrisse aller übrigen Stockwerke. In dem ersteren ist die Anordnung eines quadratischen schachtartigen Raumes, welcher von unten bis zu dem vorletzten Geschosse dicht unter der Plattform reicht, der eigenartigste Bautheil der ganzen Anlage. Veranlafst wurde er durch die oben S. 182 erwähnte, etwas dunkle, aber für jeden Techniker verständliche und für die Sache selbst unschätzbare Mittheilung des Jâqût, dafs die Treppe sich drehe um ein leeres Etwas wie ein Brunnen, von dem sie behaupten, dafs es verderblich sei und dafs man, wenn man etwas hineinwerfe, nicht wisse, wo es zu liegen komme usw. Dieser Schacht war in dem Sostratos-Bau sicher vorhanden, weil ihn später hineinzubauen, technisch unmöglich gewesen wäre; er diente als Arbeitsschacht für den Tagesbetrieb, um den Leuchtstoff bis zu dem grofsen kuppelüberwölbten Raum des vorletzten Ge-

69) Josephus, Bell. Jud. IV. 10, 5 u. V. 9, 98 sowie Antiq. Jud. XVI, 52.

70) Meinem hochverehrten Freunde Prof. Dr. W. Förster, Director der Berliner Sternwarte, verdanke ich die oben angeführten Festsetzungen.

71) Mahmoud Pascha, Mém. sur l'antique Alexandrie. Copenhague 1872. S. 36. — Das auf der Insel Pharos jetzt aufgestellte Leuchtfeuer hat bei einer Thurmhöhe von 63 m 34 km Blickweite, besitzt aber vorzüglich construirte Leuchtapparate.

schosses hinaufzuschaffen, von welchem aus der Transport durch Menschen bis zu dem Feuerbecken erfolgte. Der Betrieb selbst fand statt mittels eines endlosen Seiles, welches über zwei oben und unten aufgestellte Haspel laufend, die mit Steinöl gefüllten Thonkrüge nach oben förderte.[72]) Wegen der leichten Verbindung dieses Schachtes an passenden Stellen mit sämtlichen elf Geschossen wurde es möglich, den gröfsten Theil des Thurmes als feuersicheren Speicher dauernd zu benutzen, sodafs hier im Laufe des Sommers durch den Handel der für die Wintermonate erforderliche Leuchtstoff leicht gesammelt werden konnte.[73]) Die Zweckmäfsigkeit des Schachtes bezüglich der Ersparnifs an Zeit und Kraft bedarf keines näheren Nachweises.[74]) Diese praktische Anlage ist nicht in Alexandria erfunden worden, sie stammt sicher aus Babylon, wo sie im grofsen Mafsstabe bei dem Bau der hängenden Gärten der Semiramis, einem der gewaltigen Prachtbauten Nabuchodonossors, etwa 590 bis 580 zur Ausführung gelangt war. Wahrscheinlich ist diese sehr eigenthümliche Art der Wasserhebung an den hohen Ufern des Euphrat[75]) entstanden und hat verschiedene Formstufen durchgemacht, bis es gelang, sie für solche Luxusbauten, wie jene hohen Terrassengärten, nutzbar zu machen. Der riesige Schutthügel Maklubeh oder Mudschellibeh ist der traurige Rest jener früh zu den sieben Wundern der alten Welt gerechneten Schöpfung. In ihm hat Rassam bei seiner zweiten Forschungsreise vier von den alten Förderschächten aufgefunden und damit die oft angezweifelte Richtigkeit der Ortsüberlieferung erwiesen.[76])

Ebenso sicher erscheint mir die Annahme, dafs kaum ein anderes Bauwerk jener Riesenstadt auf die Architekten Alexanders so eingewirkt haben wird, als dieses, denn es war das eigenartigste von allen. Welcher Fürst zuerst den Versuch gemacht hat, für den prachtvollen Bau der am Hafen belegenen Königspaläste das herrliche Schmuckelement jener Terrassengärten nach Alexandria zu übertragen — ob Ptolemaios I. Soter oder erst sein Sohn Philadelphos —, wissen wir nicht, dafs aber eine oder mehrere solcher Prachtbauten damals hier entstanden sind, dürfen wir bei der längst erkannten innigen Verbindung der Küstenstädte Campaniens mit Alexandria um deswillen schliefsen, weil in den zahlreichen Landschafts- und Architekturbildern aus Herculaneum und Pompeji mehrfach stattliche Terrassengärten mit Säulenhallen auf hohen gewölbten Unterbauten so charakteristisch dargestellt sind, dafs solche Luxusbauten an der tyrrhenischen und campanischen Küste, die den Malern als Vorbilder gedient haben, vorausgesetzt werden dürfen. Das beifolgende, aus Roux, Herculanum et Pompeji III. 16 entlehnte Bild, Text-Abb. 17, ist ein solches Beispiel, denn es zeigt auf einer weit in die See vortretenden Halbinsel, deren Ufer gewölbte Futtermauern fest und sicher umsäumen, neben einer hinten links aufragenden mehrgeschossigen Meeresvilla im Vordergrunde einen zum behaglichen Naturgenusse bestimmten anmuthigen Terrassengarten mit hohen Bäumen und schattigen Säulenhallen, dessen Pflege und Erhaltung ohne zweckmäfsige und dauernde Bewässerung nicht zu denken ist.

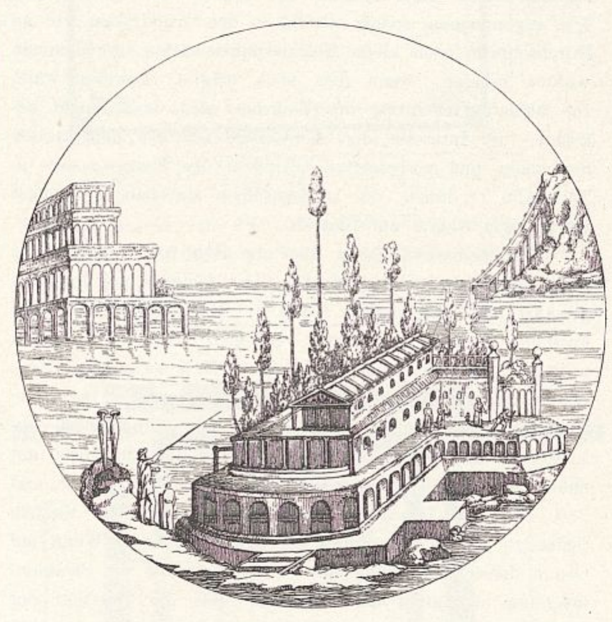


Abb. 17.

Jedenfalls hat Sostratos den hohen Werth derartiger Förderschächte gekannt und für seinen Pharosbau mit grofsem Vortheil benutzt. In dem obersten kuppelüberwölbten Arbeitsraume oder in den Nebenräumen konnten in der späteren Zeit des Heron ohne Schwierigkeit die von ihm erfundenen Maschinen (Bälge und Windladen) aufgestellt werden, um durch die auf der Plattform gelagerten Tritonen akustische Signale zu geben. Der Grundrifs der Laterne auf Blatt 21 Abb. 6 zeigt die von mir gewählte Anordnung des als riesige Lampe gedachten Feuerbeckens nebst seinen Seitentreppen zur bequemen Füllung. Bei einem Durchmesser von 6,60 m und einer Tiefe von fast 2 m ist bei Annahme eines durch Steinbögen zusammengehaltenen Dochtkranzes und der üblichen Bedeckung mit dachziegelartig geordneten Platten aus Basaltlava hinreichender und bequem zu überwachender Leuchtstoff selbst für die längsten Winternächte vorhanden. Die auf allen Münzen deutlich wiedergegebene Laterne schliefst an sich schon die Annahme von offener Befeuerung — sei

72) Vitruv X. c. 4, S. 4 beschreibt ein solches Paternosterwerk, und seine Kenntnifs stammt sicher aus den Mittheilungen alexandrinischer Techniker.

73) In der uns erhaltenen Mechanik des Heron fehlt allerdings eine solche Maschine, aber weil alle Einzeltheile für sie da sind und Archimedes' Schraube schon im 2. Jahrh. v. Chr. für Zwecke der Wasserhebung verwandt wurde, so darf man annehmen, dafs die ungleich einfachere Hebungsanlage eines Paternosterwerkes schon in dem Grundentwurfe des Sostratos vorgesehen war.

74) Nach meiner Ansicht ist Steinöl, welches — vielleicht mit Erdharz gemischt — in einem offenen Feuerbecken verbrannt wurde, als ursprüngliches Beleuchtungsmaterial anzunehmen. Als Bezugsquellen waren schon in Plinius' Zeit Sicilien (Akragas), Zakynthos, das todte Meer, Apollonia und Babylon bekannt. Mit dem Zusammenbruche des römischen Reiches und dem Sinken des Welthandels versiechten allmählich jene Quellen für Steinöl, und Holzfeuer trat an seine Stelle. Erst im 13. Jahrh. ist man wieder zur Beleuchtung mit Oel zurückgekehrt, wie ich nachträglich aus einem Aufsatze von Grempe (Nation. Ztg. v. 3. Febr. 1901. Sonntags-Beilage) ersehe, worin auf einen Vertrag vom 13. März 1282 im Stadtarchive von Pisa Bezug genommen wird, der sich auf die Lieferung von Oel und Dochten zur Unterhaltung des Signalfeuers auf dem Leuchtthurme dieser Stadt bezieht. Vermuthlich war das Oel Olivenöl.

75) Herodot I, 493.

76) Zu Strabos Zeit wurden die hängenden Gärten noch benutzt, doch war die Form des Betriebes geändert worden, weil der Verfasser von schneckenförmigen Pumpen spricht. Strabo a. a. O. p. 138.

es Holz, sei es Steinöl — aus, und dazu stimmen auch die Meldungen bei Plinius und Statius, dafs das Pharoslicht mit einem Sterne verwechselt werden könne oder dem Monde gliche. Der Nutzen einer grofsen, ruhig und gleichmäfsig brennenden Lampe ist sicher bald erkannt worden. Erstlich wird gegen Holzstöfse oder offene Feuerbecken sehr an Raum gespart, ferner verbrennt das Steinöl ohne Asche und giebt mehr Licht als die gleiche Gewichts- und Volumenmenge Holz. Als besonderer Vorzug darf endlich die Thatsache gelten, dafs, weil die Oelflamme röthlich ist, ihre langen Lichtwellen von Dunst und Nebel am wenigsten verschluckt werden. Wahrscheinlich haben vor Eröffnung des dauernden Betriebes — vielleicht sogar vor dem Aufbau der Laterne — mehrjährige Versuche, an welcher sich die Physiker und Mathematiker des Museums betheiligten, stattgefunden, bis man den besten Stoff gefunden und die zweckmäfsigste Einrichtung getroffen hatte. Es ist daher auch sehr wohl möglich, dafs durch Heron auf Grund seiner bewundernswürdigen Katoptrik in dem letzten vorchristlichen Jahrhundert zur Verstärkung der Lichtwirkung noch ein grofser Metallspiegel in der Südwand der Laterne aufgestellt und lange benutzt worden ist. Derselbe hat ein solches Aufsehen gemacht, dafs die Erinnerung daran bei den arabischen Schriftstellern nie aufgehört hat,[77]) ja dafs sein Ruhm sogar in die provençalische Litteratur eingedrungen ist.[78])

Alle übrigen in dem Querschnitte Blatt 21 Abb. 1 gezeichneten Oeffnungen und Constructionen einschliefslich der in den Aufsenmauern liegenden Rampe bedürfen ebensowenig der Erläuterung, als der massive Unterbau und der Felsboden, dessen Oberkante 4 m über See angenommen wurde.

Das Schaubild Blatt 19, welches Castrum und Pharos vom Meere aus gesehen darstellt, ist im Mafsstabe von 1 : 400 bei einer Entfernung des Beschauers von 300 m vor der Bildebene, welche durch die Nordostecke des Castrum gelegt wurde, gezeichnet worden. Links von dem mit vier Eckthürmchen besetzten und innerhalb seines Hofes mit zwei Siegeszeichen — auf Land- und Seesieg deutend — geschmückten Castrum öffnet sich der Kriegshafen, während man rechts die Befestigung der Norduferlinie der Insel erblickt. Infolge der grofsen Entfernung von der Stadt und bei der verhältnifsmäfsig geringen Küstenerhebung konnte in dem Hintergrunde nur das Paneion, ein Peripteraltempel und ein öffentliches, durch zwei Obelisken geziertes Gebäude als die Stadt Alexandria angedeutet werden. Den Vordergrund beleben Schiffe, zwei mit voller Besatzung ausfahrende Kriegsschiffe, links eine Monere, neben ihr rechts eine Diere, sowie in der Mitte eine vornehme Lustbarke und ganz rechts eine kleine Jolle mit zwei Standruderern.

IV. Der Meister des Werkes.

Je dürftiger die klassischen Quellen über den Bau des Pharos fliefsen, um so erfreulicher ist die Thatsache, dafs in der jüngsten Zeit aus dem Leben des Meisters neue und zuverlässige Nachrichten bekannt geworden sind. Da dieselben bis zum Jahre 260 reichen und aus der Inschrift des Thurmes sicher hervorgeht, dafs Sostratos in Knidos geboren war, aus welcher Stadt sein Vater Dexiphanes frühestens 330 auswandern konnte, um von Deinokrates dauernd beschäftigt zu werden, so ergiebt sich mit grofser Wahrscheinlichkeit, dafs Sostratos mindestens ein Alter von 70 Jahren, eher mehr als weniger, erreicht hat. Im Abschnitte I wurde die hervorragende Stellung angedeutet, welche Dexiphanes bei Deinokrates eingenommen haben mufs, weil dieser ihm bei dem neuen Stadtbau den weitaus schwierigsten Theil — den Bau des Heptastadion — übertragen hatte. Schwerlich hat der grofse Meister einen jungen Mann damit betraut, sondern sicherlich einen Techniker gewählt, dessen Ruf und Ansehen ein gutes Gelingen verbürgte. Daher darf man das Geburtsjahr des Dexiphanes in Knidos etwa um 365 ansetzen, sodafs der Aufbau der benachbarten Residenz des Mausolus, Halikarnafs einschliefslich des Mausoleums, fertig geworden war, als er um 345 in die Praxis eintrat. Fünfzehn Jahre später wurde er Hauptgehülfe des Deinokrates in Alexandria. Nicht die Aufschüttung des Dammes an sich war schwierig, sondern die Erfüllung der damit verbundenen Forderungen, in diesem eine Wasserleitung für den befestigten Osttheil der Insel Pharos anzulegen und aufserdem zur nothwendigen Verbindung der beiden Häfen zwei zu überbrückende Wasserstrafsen[79]) von mindestens 10 bis 12 m Breite herzustellen. Diese Forderungen bedingten aufser der sicheren Gründung der Landpfeiler unter Wasser die Durchführung der Leitung entweder durchweg tunnelartig im Felsboden oder die Anlage zweier Düker an den Brücken, alles Aufgaben, die wesentlich constructiver Natur waren. Dexiphanes war offenbar mehr Bauingenieur als Architekt, wenn auch beide Richtungen damals noch nicht streng geschieden waren. Unter der nahe liegenden Annahme, dafs der Sohn in seinen jungen Jahren den Vater bei jenen schwierigen Arbeiten dauernd unterstützt und dadurch die nothwendigen Erfahrungen im Ingenieurbaufache gesammelt haben wird, die ihm später bei dem Pharosbaue zu gute kommen sollten, wird uns die etwas befremdende, aber immerhin mögliche Meldung des Lucian verständlich, dafs Sostratos durch Ableitung des Nils die Stadt Memphis ohne Belagerung dem Ptolemaios in die Hände geliefert habe.[80]) Eine nähere Prüfung ist ausgeschlossen, weil der Verfasser den Ptolemäerfürsten nicht näher bezeichnet. Vermuthlich war es Philadelphos, aber warum dieser Friedensfürst Memphis zu belagern hatte, ist unbekannt.

Ueber den weiteren Lebensgang des Künstlers ist nur eine Nachricht vorhanden, diese ist aber von Bedeutung. Plinius[81]) meldet von ihm, dafs er der erste gewesen sei, welcher in Knidos eine schwebende Wandelhalle (*ambulatio pensilis*) erbaut habe. Weil Pseudo-Lucian[82]) von Wandelhallen des Sostratos spricht, so ist es zweifelhaft, ob zwei Gebäude von gleicher Gattung vorhanden

77) Des Spiegels gedenken Mas'ūdī, Benjamin von Tudela, Idrīsī, Qazwīnī, Qalqašandī usw. Jāqūt ist der Einzige, der seine Existenz bezweifelt.

78) Otto Söhring, Werke bildender Kunst in altfranzös. Epen. 1. Theil. Inaug. Dissert. 1900. S. 15.

79) Beide Brücken sind im 4. Jahrh. n. Chr. (um 370—380) als hohe Tonnengewölbe, so dafs sie Portalen glichen, erneuert worden. Chronique de Jean, évêque de Nikiou. T. XVII. 325.

80) Lucian, Hippias 2. Droysen, Gesch. d. Hell. I², 135. Note 153.

81) Plinius XXXVI. 12, 18.

82) Pseudo-Lucian, Amor. 11.

waren oder ob ein Gebäude mit mehreren Hallen über einander den Gegenstand des Künstlerruhmes bildete. Ich ziehe die letztere Auffassung vor, weil zwei über einander geordnete Stoen nicht als etwas Neues, Aufsehen machendes gelten konnten (die Tempel von Aegina, Athen, Olympia, Poseidonia usw. besafsen sie längst), wohl aber, wenn man sie von den Tempeln abgelöst am Markte oder am Hafen mittels eines Unterbaues so hoch aufstellte, dafs sie im Erdgeschosse zu profanen Zwecken, Verkaufslocalen, Magazinen, Schenken usw. benutzt werden konnten und doch die Möglichkeit boten, oben als Spazierhallen der Erholung zu dienen. Geschah dies, so lag es nahe, ja war geboten, den Unterbau durch parallel neben einander gelegte Tonnengewölbe feuersicher zu machen, wie solches die von Benndorf und Niemann veröffentlichten Granarien bezw. Magazine zu Patara und Andriake, wenigstens in den Grundmauern erkennen lassen.[83]) Bei Patara darf man mit einiger Sicherheit eine obere Spazierhalle voraussetzen. Auch in Pergamon zeigt die Theaterterrasse eine ähnliche Anordnung.[84]) Das glänzendste Beispiel einer solchen bis auf den heutigen Tag erhaltenen *ambulatio pensilis* ist die grofsartige Wandelhalle des Diocletian-Palastes zu Spalato, in welcher beide Stockwerke, der hohe Unterbau sowie die Wandelhalle gewölbt waren. Die letztere liegt 32,4 m über dem Meere und hat bei einer Breite von 7,7 m eine Länge von 163,3 m (also fast ein Stadion) zwischen den Eckrisaliten.[85])

Jedenfalls ist es nicht unmöglich, dafs der neue eigenartige und wohlgelungene Bau von Knidos — um 310 — für Ptolemaios I Soter Veranlassung gewesen ist, den Künstler bei der Ausführung ähnlicher Anlagen in seiner Residenz zu beschäftigen, bis er die Ueberzeugung gewann, in ihm den rechten Mann für den längst geplanten Pharosbau zu besitzen, sodafs auch hierdurch das Jahr 299 für den Baubeginn sich genügend erklärt. Das hohe Ansehen, in welchem Sostratos bei den beiden ersten Ptolemäern stand, ist in Strabos Ausdruck: er sei „ein Freund der Könige“ gewesen deutlich zu erkennen, er war Mitglied des Staatsrathes. Und dafs er in dieser Stellung auch mehrfach diplomatische Sendungen mit Erfolg erledigt haben mufs, hat schon Droysen erkannt[86]) und bestätigen jetzt Inschriften aus Delos wie Delphi. Auf Delos giebt ihm der Inselbund in einem Decrete denselben Ehrentitel und weiht ihm dort die Stadt Kaunos in Karien ein ehernes Standbild. In Delphi, wo er höchst wahrscheinlich zur Sicherung der Grundmauern der alten wegen ihrer Gemälde des Polygnotos hochberühmten Halle der Knidier eine neue Stützmauer erbaut hatte — inschriftlich als Anathem dem Apollo geweiht — erhielt er mit anderen Bürgern seiner Vaterstadt hohe Ehrenrechte[87]).

83) Benndorf u. Niemann, Reisen in Klein-Asien. Bd. I. S. 116 u. Bd. II. S. 41.

84) Conze u. Bohn, Pergamon IV. Taf. 17.

85) Joseph Lavallée, Voy. pitt. et hist. de l'Istrie. T. 36 u. 54. In Knidos sind aufser den Hallen des Sostratos, deren Reste Leake und die Architekten der Dilettanti-Gesellsch., seltsamer Weise — in der ganz späten dorischen Säulenhalle am Bergabhange erkennen wollten, ähnliche Stockwerkbauten von Speichern und Wandelhallen vorhanden gewesen, wie der Lageplan bei Newton Bl. L. andeutet. Die besten Ruinen hat Mehmet Ali 1832—1841 abbrechen lassen und die Steine in Alexandria verbraucht.

86) Droysen, Hell. II¹, 218. Fufsnote 119, Prof. v. Willamowitz, Phil. Unters. IV. 228 bezeichnet ihn als Admiral des Ptolemaios. Ob er bei Kos mitgefochten hat, steht nicht fest.

87) Perdrizet a. a. O. S. 266ff.

Auch seine dichterischen Zeitgenossen am Königshofe haben mit ihrem Beifalle nicht gekargt, wie das vor einigen Jahrzehnten gefundene Epigramm des Poseidippos erkennen läfst[88]). Zuletzt hat auch ein Demos in Ober-Aegypten bei Theben seinen Namen lange bewahrt.

Aus allen diesen zum Theil urkundlichen Ueberlieferungen ergiebt sich die Thatsache, dafs er wegen seiner hohen und vielseitigen Begabung in seiner Zeit eine besonders hervorragende Rolle gespielt haben mufs. Kraft seiner künstlerischen bahnbrechenden Erfolge wird er unter den ersten Meistern des Faches stets einen Ehrenplatz behaupten.

Schlufs.

In der Entwicklung der griechischen Baukunst hatte gleich nach dem ruhmvollen Kampfe gegen Persien die von der Natur (Marmor des Pentelikon) und von der Geschichte (Perikles, Pheidias und Iktinos) so sehr bevorzugte attische Schule die Führung gewonnen und durch ihr ernstes zielbewufstes Streben nach dem Höchsten sowohl auf künstlerischem als auch auf bautechnischem Gebiete eine Stufe erstiegen, welche für die hieratische Baukunst des klassischen Alterthumes den Abschlufs gebildet hat. Alle Bauwerke perikleischer Zeit in Attika — die grofsen wie die kleinen — bezeugen diesen Gipfelpunkt, und den Einflufs der Schule erkennt das kundige Auge noch heut im Peloponnes, Sicilien, Unter-Italien und Klein-Asien. Bald nach dem peloponnesischen Kriege hörte aber dieser Einflufs auf, weil neue Richtungen sich geltend machen. Eine der bedeutsamsten Strömungen war das Streben, nicht wie bisher neben einander, sondern über einander zu bauen. Nicht in Hellas selbst geschah dieser denkwürdige Schritt, sondern auf kleinasiatischem Boden und zwar durch attische Künstler. In dem Mausoleum von Halikarnafs, dem bescheidene aber wichtige Vorbilder in Knidos und Xanthos zum Grunde liegen, erscheint der Stockwerkbau in überraschender Weise ausgeprägt. Während das vielbewunderte Artemision zu Ephesus nur eine Firsthöhe von 22,5 m besessen hatte, stellt hier der geniale Satyros die Höhe auf 46 m fest. Durch Alexanders Siegeszüge mufste sich diese Richtung unaufhaltsam steigern, weil die besten Architekten die riesenhaften Schöpfungen von Aegypten, Babylonien, Persien und Medien aus eigener Anschauung kennen lernten und die baustatischen wie baumechanischen Erfahrungen jener Völker sich aneignen konnten. Besonderen Eindruck mufs Babylon mit seinen Tempeln und Palästen gemacht haben. Sein Einflufs ist unverkennbar in den schwebenden Wandelhallen, die einst von Knidos über Alexandria nach Campanien, ja bis nach Rom gereicht haben und sicher mit der noch erhaltenen Wandelhalle in Spalato nicht zum Abschlufs gelangt sind, weil sie weitere Pflege in Constantinopel fanden.

Weil es aber den Absichten der Diadochen entsprach, ihren neu gegründeten Residenzen weit gesehene Mittelpunkte, sei es durch hochragende Tempel, sei es durch stolze Paläste zu schaffen, so ist es begreiflich, dafs Alexandria, welches von Anfang an zur Weltstadt berufen sich zunächst

88) Monum. publ. p. l. Soc. des études grecques 1879. 30 u. 59. (Weil). Rhein. Mus. XXXV. 90. (Blass) u. 258 (Bergk).

unter den günstigsten Verhältnissen zu einer mustergültigen Residenz mit stetig wachsendem Hafenverkehr entwickelt hatte, sehr bald durch seinen Pharosbau den höchsten Gipfel einer fast hundertjährigen Entwicklung erstieg. Der Wagemuth, der dazu gehörte, einen massiven Thurm von über 110 m Höhe am Rande des Meeres aufzustellen, konnte nur an einem Platze entstehen, welcher — aller Ueberlieferungen bar — autokratisch aber mit staatsmännischer Klugheit regiert wurde und welcher aufser den sehr bedeutenden Geldmitteln für die vielen neuen Probleme, welche der Bau selbst mit sich brachte, die nöthigen rathgebenden Helfer und Mitarbeiter besafs. Daher ist der Pharos für Alexandria das geworden, was die Pyramiden von Memphis für Aegypten, die Mauern und die hängenden Gärten für Babylon, das Artemision für Ephesus, das Mausoleum für Halikarnafs, der Zeustempel mit dem Bilde für Olympia, der Colofs des Helios für Rhodos nach und nach geworden waren, ein vielgepriesenes Weltwunder.

Für den schwierigsten Theil meiner Arbeit, die Auszüge aus den arabischen Schriftstellern und ihren Mafsangaben haben mich aufser meinem Vetter, Herrn Dr. Carl Becker, welcher den gröfsten Theil der Uebersetzungen bereitwillig übernahm und durchführte, die Herren Dr. Horovitz und Dr. Lehmann treulichst unterstützt. Ihnen sowie den Herren Sieglin, Diels, Michaelis, Hübner, Benndorf, Trendelenburg, Förster, Assmann, Weil und Roth für ihre vielfache Hülfe an dieser Stelle meinen warmen Dank zu sagen ist mir eine werthe Pflicht.

Januar 1901. F. Adler.

Das Kunstgewerbemuseum und die neue Kunstgewerbeschule in Karlsruhe.

(Mit Abbildungen auf Blatt 22 bis 24 im Atlas.)

Die bauliche Anlage (vgl. Lageplan Abb. 5 Bl. 23) zerfällt in zwei Haupttheile, die örtlich und zeitlich von einander getrennt ausgeführt worden sind. Sie begreifen jetzt das Kunstgewerbemuseum und das Schulgebäude in sich. Mit der Ausführung des ersteren wurde im Spätherbst des Jahres 1887 begonnen, und zu Anfang October 1889 wurde es der Benutzung übergeben. Es bildet ein geschlossenes, ringsum freistehendes Bauwerk, bei dem sich die einzelnen Räume, die Tageslicht von allen vier Himmelsgegenden her empfangen, um einen von Säulengängen umzogenen, mit Glas gedeckten Lichthof gruppiren. Auf Einheit des Lichtes ist nur bei dem Hofe Bedacht genommen, der zur Aufstellung von mustergültigen, kunstgewerblichen Gegenständen aller Zeiten dienen sollte und wirklich dient, während die umliegenden Säle in allen Stockwerken zu Lehr-, Modellir- und Zeichenräumen, Lehrerateliers und Geschäftsgelassen verwandt wurden.



Abb. 1. Kunstgewerbeschule, Ansicht von Nordwesten.

Diesen Zwecken diente der Bau — in seiner Art eine Verquickung von Schule und Museum — bis vor wenigen Jahren, wo man an eine Vergröfserung desselben denken mufste, gezwungen durch einen vermehrten Zudrang von Schülern, durch Vermehrung der Museumsbestände und um neue Räume zu schaffen, in denen auch dem weiblichen Geschlechte Gelegenheit gegeben werden sollte, sich in kunstgewerblichen Dingen schulgerecht auszubilden. Dabei waren zwei Möglichkeiten der Ausdehnung gegeben. Entweder war die bestehende Bauanlage zu wiederholen bezw. zu verdoppeln, indem man zwei Lichthöfe von gleicher Gröfse schuf und diese durch eine Querstellung von Säulen oder einen in zwei Stockwerken durchgeführten, von Säulen getragenen Verbindungsgang trennte oder mit einander verband und um diese die neuen Schulräume, wie seither, weiter gruppirte — oder aber man errichtete einen Neubau vollständig unabhängig von dem bestehenden und führte eine strenge Theilung in dem Sinne herbei, dafs man den vorhandenen Bau für Museumszwecke ausschliefslich und höchstens noch zur Unterbringung der Abtheilung für Kunstgewerbeschülerinnen verwandte und dann den Neubau einzig und allein für Schulzwecke einrichtete. Man entschied sich für das letztere als das Bessere und begann mit dem Erweiterungsbau zu Anfang März 1898, der Ende Januar 1901 zum Gebrauch überwiesen werden konnte.

Der ältere oder jetzige Museumsbau konnte bei dem Wechsel der Dinge in seinem Bestande beinahe unberührt bleiben, nur das Einziehen einiger Theilwände nebst ver-

schiedenen sachgemäſsen Aenderungen in der Ausstattung sind nothwendig geworden.

In den Räumen des Erdgeschosses werden nur Musterleistungen der Textilkunst und der Keramik, Metallarbeiten und Tapeten zur Aufstellung gebracht und einige Gelasse zu Verwaltungszwecken eingerichtet, die Räume des I. Obergeschosses sind zur Aufnahme von Zimmereinrichtungen (Kojen) in verschiedenen Stilen bestimmt und enthalten noch die Arbeitsräume des Directors der Anstalt, sowie die Vorbildersammlung, während in denen des II. Obergeschosses einige Gelasse für moderne Arbeiten, der Hauptsache nach aber die Unterrichtsräume für Schülerinnen eingerichtet sind (vgl. die beistehenden Grundrisse des Erdgeschosses und des II. Obergeschosses, Text-Abb. 2 u. 3, mit der beigedruckten Bestimmung der Einzelräume).

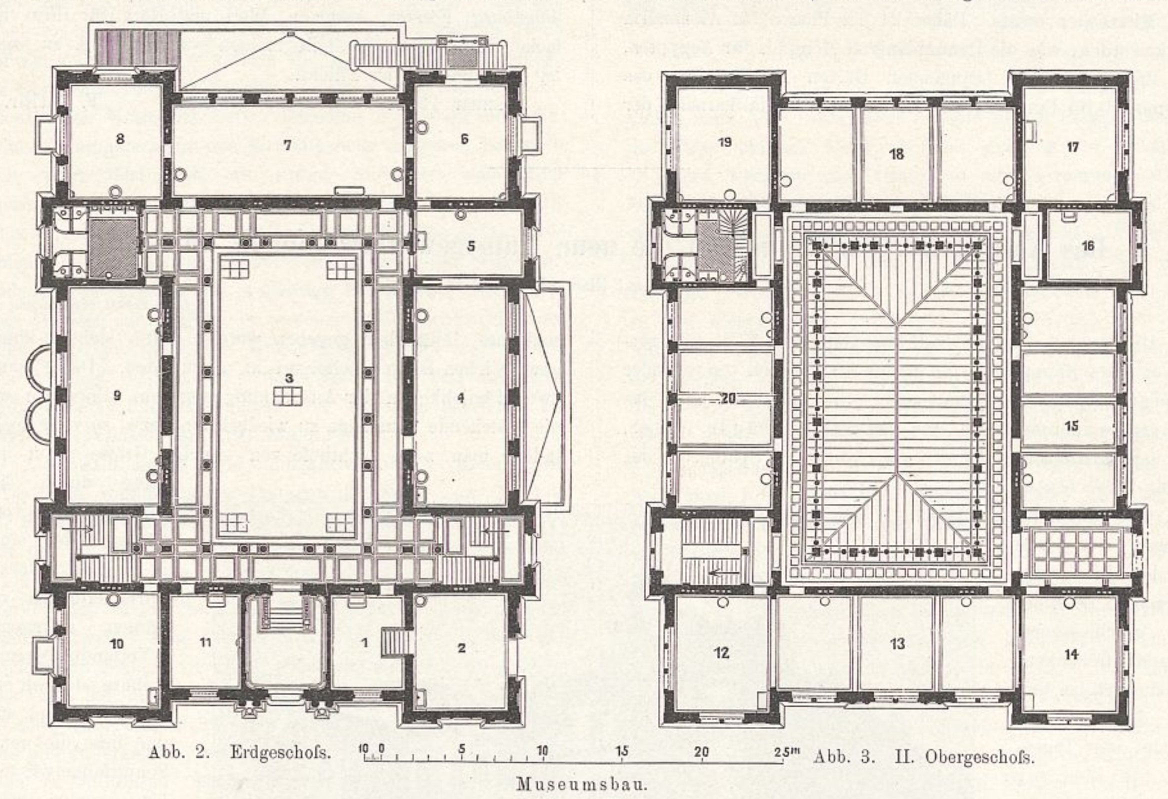


Abb. 2. Erdgeschofs. Abb. 3. II. Obergeschofs.

Museumsbau.

1 Museumsassistent
2 Reparaturwerkstätte
3 Ausstellung ausgewählter Arbeiten der verschiedenen Gruppen im Lichthof
4 Textilgewerbe und Tapeten
5 Lederarbeiten und Bucheinbände
6, 7 u. 8 Alte und neuere Keramik
9 Schmiedeeisenarbeiten, Kupfer-, Zinn- und Broncegegenstände
10 Verfügbare Räume
11 Hausmeister und Museumsaufseher
12, 13 u. 14 Räume für moderne Arbeiten
15 Unterrichtsraum zum Zeichnen nach der Natur (weibliche Abtheilung)
16 u. 17 Atelier
18, 19, 20 Unterrichtsräume der weiblichen Abtheilung.

Im Lichthofe, dessen Glas-Eisendach in der Text-Abb. 5 wiedergegeben ist, sind die ausgewählten Arbeiten der verschiedenen Gruppen des Kunstgewerbes zur Aufstellung gebracht und, in vortheilhaftester Weise beleuchtet, systematisch geordnet, wobei dann auch noch die Wände und der Raum unter den Säulenhallen in allen Stockwerken herangezogen worden sind (vgl. Abbildung auf Bl. 24).

Der nunmehrige Museumsbau, dessen Ostansicht in Abb. 2 Blatt 22 wiedergegeben ist, wurde als Massivbau erstellt, wobei zu den Sockeln rother Maulbronner Sandstein, zu den Gurten, Fenstergestellen, Quaderketten, Pilastern, Säulen, Hauptgesimsen und Giebelaufbauten graugelblicher Kürnbacher Sandstein zur Verwendung kam. Die äuſseren Mauerflächen wurden theils mit hell lederfarbenen Backsteinen (Holzmann-Blendern) verkleidet, theils verputzt und mit buntgefärbten Sgraffitodecorationen bedeckt, während die Dachdeckung mit Moselschiefern ausgeführt wurde. Nur der Dachstuhl über dem Lichthof wurde aus Eisen (vgl. Text-Abb. 5), die Dächer der anstehenden Bauten aus Holz hergestellt. Ebenso bestehen die Decken der Schulsäle aus Holzgebälken, die auf eisernen Unterzügen lagern, die Decken der Umgänge beim Lichthof sind dagegen massiv gewölbt, die darauf befindlichen Fuſsböden, wie der des groſsen Lichthofes selbst mit Terrazzo bedeckt. Die Treppenstufen, einerseits in das Mauerwerk eingespannt, anderseits auf Eisenträgern lagernd, sind aus hellgelben Maulbronner Sandsteinen ausgeführt, die Treppenhäuser massiv umwandet und feuersicher nach oben abgedeckt. Geheizt werden die Schulräume und der Lichthof vermittelst Gasöfen. Die Kosten beliefen sich im ganzen auf 303 936 ℳ.

Der Erweiterungs- oder eigentliche Schulbau, dessen Grundrisse (Erdgeschofs und II. Stock) in Abb. 3 u. 4 Blatt 23 dargestellt sind, hat entgegen dem Museumsbau eine offene, unregelmäſsige Gestaltung erhalten, die aber nicht modern gesucht ist, sich vielmehr aus der Bestimmung, Lage und zweckmäſsigen Beleuchtung der Räume ergeben hat. Für die Zeichensäle suchte man soviel als möglich Nordlicht zu gewinnen, was durch die Herstellung zweier Parallelflügel nach Norden unter Vorziehen des einen vor

den andern gelungen ist, während für die Schulräume Morgenbeleuchtung bei der Lage nach Osten ermöglicht wurde. Die Gänge kamen auf diese Weise nach Süden und Westen zu liegen, nach den Himmelsrichtungen, die am wenigsten günstig für die vorliegenden Schulzwecke sich erweisen.

Die Aborte erhielten eine eigenartige Einrichtung, die durch unsere gesetzlichen Bestimmungen hervorgerufen worden ist, wonach bei Abortanlagen öffentlicher Gebäude durch einen durchlüftbaren Vorplatz vom Wandelgang getrennt sein müssen (System des Geheimraths Dr. Battlehner, Medicinalrath in Karlsruhe).

Die Haupttreppe (Text-Abb. 4) ist in die Ecke der im rechten Winkel auf einander treffenden Süd- und Westflügel gelegt und durch Seitenlicht von den Fluren aus und durch Oberlicht beleuchtet, während eine weitere geradläufige und eine Wendeltreppe den Zugang vom Keller bis zum Speicher vermitteln. Die sämtlichen Treppenhäuser sind im Aeufseren der Architektur zum Ausdruck gebracht, wie auch die Zeichensäle und Wandelgänge durchweg durch die besondere Behandlung der Lichtöffnungen und der stützenden Mauerpfeiler von aufsen kenntlich gemacht sind.



Abb. 4. Haupttreppe der Kunstgewerbeschule.

Grundrifsanlage.

Im Kellergeschofs des Baues sind im südlichen Flügel, dem nach der Hofseite ein begehbarer, 3,50 m breiter Lichtschacht vorgelegt ist, die Brennöfen, das Laboratorium und die Thonlegen des Professors der Keramik untergebracht, im westlichen Flügel in abgeschlossenen Räumen die grofsen eisernen Kothtrommeln der Aborte, die mit Klärvorrichtungen versehen sind, von denen die Abwässer nach der städtischen Canalisation geleitet werden, dann die Gelasse für die Centralheizung mit drei Kesseln für die Niederdruck-Dampfheizung, die Räume für den Heizer und für den Koks, ein Raum für den Transformator der elektrischen Beleuchtungsanlage und weitere freie Kellerräume. Im Erdgeschofs ist neben dem Haupteingang ein Dienerzimmer, dann folgen verschiedene Ateliers und der Hauptsache nach die grofsen Modellirsäle für Bildhauer, Keramiker und Holzschneider sowie ein gröfserer Actsaal.

Im ersten Obergeschofs sind aufser einem grofsen und kleinen Vortragssaal die Säle für Figurenzeichnen, Stilllebenmaler, Ateliers für Professoren und Unterrichtsräume für Zeichenlehrer untergebracht, während im zweiten Obergeschofs Säle und Zimmer für Ciseleure, Architekturschüler, Lithographen, Decorationsmaler und einige Professorenateliers ausgeführt sind. Im Dachstock sind neben den offenen Speicherräumen noch kleinere Ateliers und Requisitenräume vorhanden. (Vgl. die Grundrisse des Erdgeschosses und des ersten Obergeschosses Abb. 3 u. 4 auf Bl. 23, sowie den Querschnitt AB in Abb. 3 Bl. 22 in Bezug auf die gewählten Stockhöhen).

Innenbau.

Die Decken der Räume des Kellergeschosses sind mit Stampfbeton zwischen Walzeisenstäben ausgeführt, die Fufsböden der Gänge in allen Stockwerken mit Mettlacher Fliesen belegt, die Fufsböden der Modellirräume asphaltirt, diejenigen aller Zeichensäle mit Eichenparketts versehen, je nach den Verhältnissen in Asphalt oder auf Blindboden verlegt. Die Decken der Säle im Erdgeschofs sind aus Walzeisenstäben mit Stampfbeton, die der darüber liegenden Geschosse aus Tannenholzbalken mit Wickelfachen hergestellt. Die Wandelgänge in allen Stockwerken haben Betondecken zwischen Walzeisenstäben.

Die Gebälke liegen alle wegen der hochgeführten Fenster und der Ventilationsschlote in den Gangmauern parallel zu den Umfassungsmauern, abgestützt durch Unterzüge aus Walzeisen, die von jedem Fensterpfeiler aus angeordnet sind.

Die Wände im Inneren sind verputzt und vom Boden bis Fensterbrüstungshöhe mit Holztäfelungen versehen, welche in den Modellirsälen durch Bekleidungen mit hellen Fayenceplättchen ersetzt sind. Auch die Fensterbrüstungen in den Gängen sind alle mit Fayenceplättchen verkleidet, ebenso auch die Abortwände in allen Stockwerken. Die Pissoirstände sind mit dunkeln polirten Granitplatten ausgekleidet und mit Oelverschlufs versehen worden; gleichfalls aus polirten

Granitplatten sind die Fenstersimse in den Wandelgängen und in einigen Sälen hergestellt.

Die Haupttreppe ist in Schmiedeeisen ausgeführt mit Trittstufen von Eichenholz, die mit Linoleum belegt und mit messingnen Kantenleisten versehen sind; in gleicher Weise ist auch die zweite geradläufige Treppe hergestellt, die Wendeltreppe aber ganz aus Sandsteinen mit freitragenden Tritten. Die Treppenabsätze sind aus Walzeisenstäben mit Betoneinlagen ausgeführt, die der geradläufigen Treppe mit Kreuzgewölben unterwölbt und deren Flächen mit reichen Handstuckverzierungen geschmückt. Die Geländer aller Treppen sind als Kunstschmiedearbeiten behandelt.

Decken und Wände der Arbeitsräume sind der elektrischen Reflexbeleuchtung wegen weifs gemalt und ebenso die Wände auf die Höhe von 1,20 m vom Deckengesimse abwärts, aber durch hellgraue Friese in Felder eingetheilt. Zwischen diesen Friesen und den Täfelungen sind die Wandflächen mit graugrünen Tapeten bezogen, die Thüren und alles übrige Holzwerk geölt unter etwas Farbenzusatz und lackirt. Die Gangfenster sind durchgehend mit Rauten und Butzen, die übrigen Fenster selbstverständlich mit hellem Krystallglas verglast.

Die Heizkörper bestehen im ganzen Baue aus Radiatoren, die auf polirten Granitplatten frei (ohne Umkleidung) in Wandnischen stehen, deren Flächen mit hellen Fayenceplättchen ausgekleidet sind. In allen Sälen sind Thermometer angebracht, in besonders ausgekleideten Mauerschlitzen, sodafs die Hausdiener die Wärmegrade in den Unterrichtsräumen vom Gange aus, ohne jene betreten zu müssen, ablesen und danach die Heizung reguliren können. Zur Lüftung sind in jedem einzelnen Raume Abluftkamine mit Regulirvorrichtungen angebracht. Die städtische Wasserleitung mit Zapfstellen in den Brunnenhallen der Westgänge, sowie in allen Zeichen- und Modellirsälen, mit Hydranten in den Gängen, auf dem Speicher, dem Hofe und den Vorgärten ist im ganzen Gebäude durchgeführt, ebenso eine Zweiggasleitung nach den Brennöfen und Arbeitsgelassen für Keramik im Kellergeschofs. Die Anstalt wird von dem städtischen Kraftwerk aus mit elektrischem Licht versorgt.

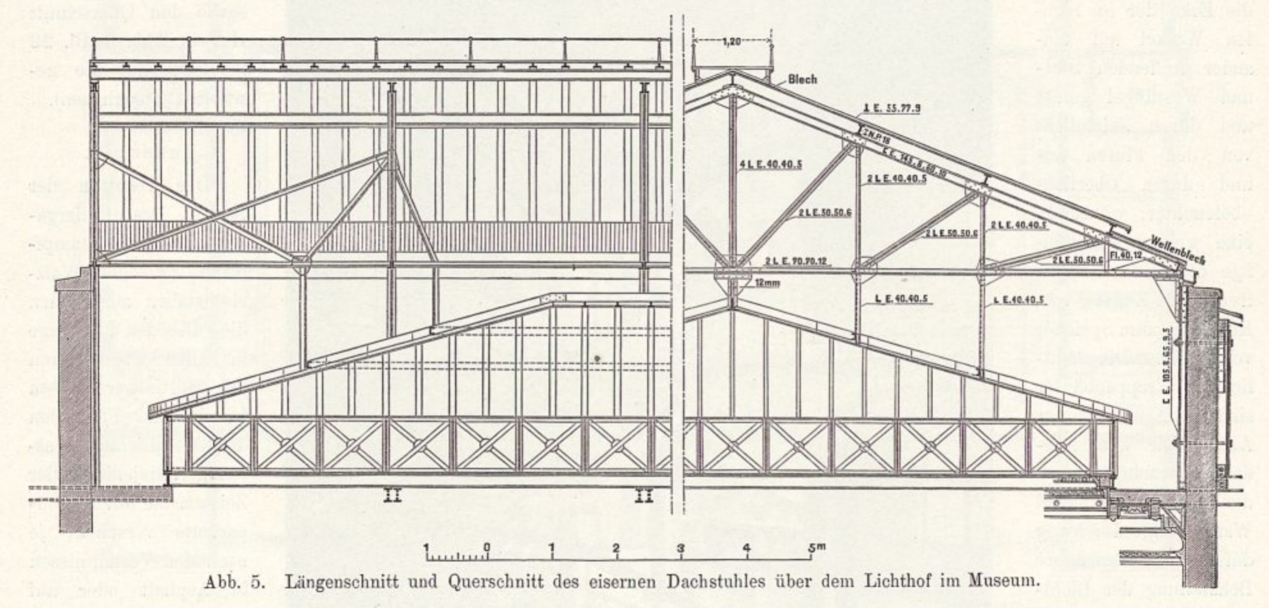


Abb. 5. Längenschnitt und Querschnitt des eisernen Dachstuhles über dem Lichthof im Museum.

Aeufseres.

Das Aeufsere des Neubaues ist in weniger strengen Formen durchgeführt, als der Museumsbau, wenn auch beide unter gewissen Modificationen die Stilweise der deutschen Renaissance zeigen. Das heutigentags wohl mit Recht betonte malerische Moment in der Architektur tritt hier mehr in den Vordergrund. Unter Wahrung der gleichen Stockhöhe bei beiden Bauten ist der Sockel aus rothem Maulbronner Sandstein ausgeführt, die Schichtquaderchen des Erdgeschosses, die Gurten, Fenster, Portale, Hauptgesimse und Aufbauten aus hellgrau-gelben Mühlbacher Sandsteinen, die Mauerflächen weifs verputzt und zum Theil mit schwarzem und buntem Sgraffito verziert, einige Felder der Nordseite wurden entsprechend dem Museumsbau mit Backsteinblendern bekleidet, über welchen in der Art der Robbia ausgeführte Medaillonbilder deutscher Kleinkünstler — weifsglasirte Köpfe auf smaltblauem Grunde — Werke des Keramikers der Anstalt, des Professors Kornhas, prangen (vgl. Abb. 1 Bl. 22, sowie die Abb. 1 u. 2 auf Bl. 23).

Die Dachflächen sind nach deutscher Art mit mittelgrofsen Moselschiefern eingedeckt, die kleinen Thurmhelme und Gaupenspitzen sind theils aus Kupfer, theils aus Blei gefertigt. Zur Aufnahme der Schuluhr wurde das kleinere Treppenhaus als Uhrthurm mit grofsen Zifferblättern ausgebildet.

Hof und Vorgärten sind durch Wege, Rasenflächen und Buschwerk belebt, einzelne Theile sollen als Studiengärten hergestellt werden.

Baukosten.

Die Kosten des Baues, ohne innere Einrichtung — Schulmobiliar u. dgl. — belaufen sich auf 564 526,75 ℳ oder das Cubikmeter umbauten Raumes auf 21,50 ℳ. Die beiden Bauten wurden nach den Entwürfen und Detailzeichnungen und unter der Leitung des Vorstandes der Grofsherzogl. Baudirection, des Architekten und Professors Dr. Josef Durm in Karlsruhe ausgeführt. Als Bauführer war der Grofsherzogl. Baupraktikant Otto Linde beschäftigt.

Karlsruhe, im Februar 1901.

Dr. Josef Durm, Architekt.

Das Cistercienserkloster Neuzelle in der Nieder-Lausitz.

Von dem verstorbenen Regierungs- und Schulrath H. Ruete in Frankfurt a. O. und dem Regierungs- und Stadtbaumeister W. Bollert in Witten a. d. Ruhr.

(Mit Abbildungen auf Blatt 25 bis 27 im Atlas.)

Der Eisenbahnzug von Berlin nach Schlesien führt uns durch weite Kiefernwaldungen nach der alten Stadt Frankfurt a. O., wo dem Auge der Blick sich öffnet in das fruchtbare Oderthal und auf den belebten Strom. Die Hügelreihe zur Rechten, welche hier den Rand des Oderthales in steilem Abfall bildet, tritt später, nachdem man den Canal bei Finkenheerd hinter sich hat, mehr und mehr zurück und entschwindet fast dem Auge in der Ferne, bis man sich der Stadt Fürstenberg a. O. nähert. Dort spannt sich ein Bogen von ziemlich ansehnlichen Höhen, der seine offene Seite uns zukehrt und immer näher herantritt, je weiter wir auf der Bahn uns fortbewegen, bis wir den Punkt erreichen, wo sich die Hügelkette mit dem Bahnkörper berührt. Hier hält das Dampfrofs und wir erblicken vor uns auf der Höhe (Text-Abb. 1*) ein stattliches Häusergeviert, hochragende Thürme, alterthümliche Kirchen mit steilem Dach und schöngeformter Kuppel; im Grunde fort und zur Seite zeigt sich eine freundliche Häuserreihe, und das Ganze macht einen grofsartigen, zugleich auch anziehenden Eindruck auf den Reisenden.



Abb. 1.

Wir sind in Neuzelle.

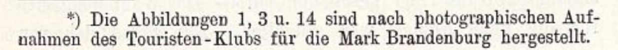
Diese stattlichen Gebäude bildeten einst ein Mönchskloster des Ordens der Cistercienser, und der Ursprung des Klosters führt uns sechs Jahrhunderte zurück.

Die heutige Nieder-Lausitz gehörte damals dem Hause Wettin. Als Kaiser Heinrich I. mit den Ungarn Abrechnung hielt, hatte er Deutschlands feindliche Nachbarn im Norden und Osten bereits unterworfen. Zu diesen gehörten die Slaven in der Mark Brandenburg und die Sorben im Meifsener Lande und in der Ober-Lausitz. Zur Sicherung letztgenannter Errungenschaft gründete er an der Elbe die feste Stadt Meifsen, und sein Sohn Otto der Grofse setzte in den eroberten Ländern Markgrafen ein. Der erste war Gero I., der Grofse, welcher einem am Harze ansässigen Sachsengeschlechte entstammte und als Stifter der einst berühmten Frauenabtei Gernrode im heutigen Anhalt bekannt ist. Der tapfere Gero eroberte auch die heutige Nieder-Lausitz, und nach seinem Tode (965) verblieb die Verwaltung der von Kaiser Otto errichteten Markgrafschaft seiner Familie noch geraume Zeit. Später wechselten häufig die Familien, aus denen die Markgrafen hervorgingen, bis Kaiser Lothar von Sachsen die Markgrafschaft Meifsen, zu welcher auch die Lausitz gehörte, im Jahre 1130 dem Markgrafen Konrad dem Grofsen aus dem Hause Wettin verlieh, welches sie 175 Jahre lang behielt.

I. Vorgeschichte der Klostergründung.

Ein edler Sprofs dieses Hauses war Heinrich der Erlauchte, in dem das Kloster Neuzelle seinen Stifter verehrt. Er war im Jahre 1218 als der fünfte Sohn des Markgrafen Dietrich geboren, der am 17. Februar 1221 durch seinen Leibarzt vergiftet wurde. Von den älteren Brüdern hatten sich zwei dem geistlichen Stande gewidmet, und zwei waren frühzeitig gestorben. Als dreijähriger Knabe folgte Heinrich seinem Vater in dem Besitze und in der Regierung des Landes. Während seiner Minderjährigkeit führte sein Oheim, der Landgraf Ludwig der Heilige von Thüringen, die vormundschaftliche Regierung, und die Mutter des Prinzen wurde als Mitregentin angenommen. Mancherlei Unruhen führten den Prinzen mit seiner Mutter aus dem Lande. Sie flohen zum Herzog Leopold I. von Oesterreich (1224), wo der Knabe zum ersten Male seiner zukünftigen Gemahlin Constantia, der Tochter des Herzogs, begegnete, die er in seinem 16. Lebensjahre heimführte.

Noch im jugendlichen Alter übernahm Heinrich die Regierung und trat als 19jähriger Jüngling in die Oeffentlichkeit. Der erste Bischof unter den heidnischen Preufsen mit Namen Christian sah bald einen meuternden Kampf der Preufsen entfesselt. Als die Schwertritter und andere Kriegsleute zu seiner Hülfe herbeieilten, aber nichts ausrichteten, wandte der Bischof sich an die Ritter des deutschen Ordens. Der Kaiser Friedrich II. schenkte dem Orden das zu erobernde Land, und Markgraf Heinrich machte sich im Jahre 1237 mit 500 Rittern auf, um den deutschen Orden zu unterstützen. Dieser Kriegszug verlief glücklich, und er wird mit der Gründung des Klosters Neuzelle insofern in Verbindung gebracht, als der erste Gedanke hierzu bei dieser Gelegenheit in ihm entstanden sein soll. Er kam, so wird erzählt,



*) Die Abbildungen 1, 3 u. 14 sind nach photographischen Aufnahmen des Touristen-Klubs für die Mark Brandenburg hergestellt.

auf dem Rückwege zu Ende des Jahres 1238 an einen Ort, der Sturzedel oder Starzedel (d. h. alte Ansiedlung) benannt wurde. Hier sah er in den Ebenen unter niedrigem Gebüsch Tauben sitzen, sagte zu seinen Genossen, hier könnten wohl besser vernünftige Tauben wohnen, und fafste den Entschlufs, daselbst ein Kloster des Cistercienserordens zu gründen, dessen warmer Freund er war.

Kriegerische Unruhen verzögerten die Ausführung. Sowohl der thüringische Erbfolgekrieg als auch die blutigen Fehden im Schofse seiner Familie nahmen ihn zu sehr in Anspruch, als dafs er den Gedanken an die Gründung eines Klosters hätte aufnehmen können. Erst mit dem Tode seiner zweiten Gemahlin Agnes († 1267), der Tochter des Königs Ottokar von Böhmen, traten ruhige Zeiten ein. Und wenn wir bedenken, dafs Heinrich das Kloster Neuzelle nach der Chronik „zum Gedächtnifs und ewigen Heil“ dieser zweiten Gemahlin gegründet hat, so können wir, wie auch gewöhnlich geschieht, die Gründung in das Jahr 1268 setzen.

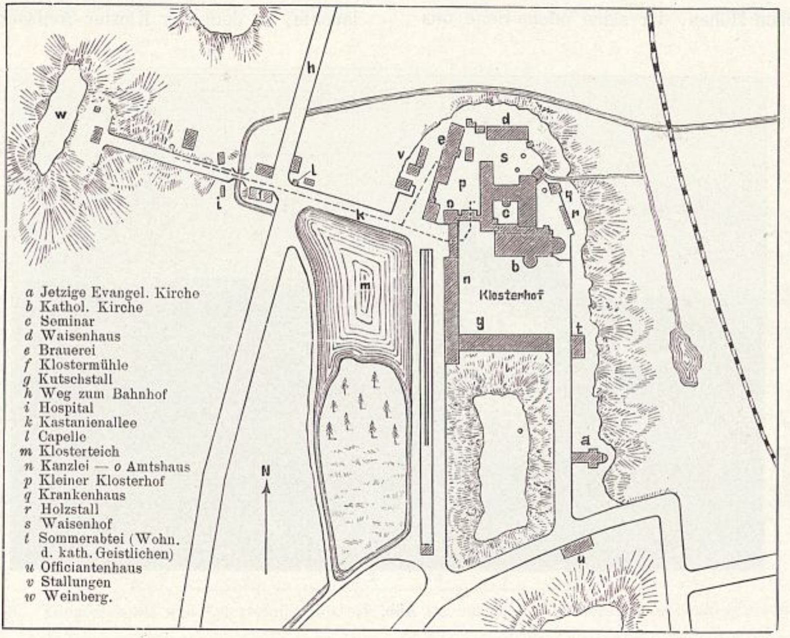


Abb. 2. Uebersichtsplan des Stiftes.

Urkundlich ist es jedoch nicht festgestellt; denn die am 12. October 1268 in Dresden vollzogene Stiftungsurkunde nennt das Jahr der Gründung des Klosters nicht. In der Urkunde erklärte der Markgraf, dafs er beschlossen habe, ein Kloster zu Ehren der Jungfrau Maria zu gründen und Mönche aus dem Cistercienserorden hineinzusetzen; er habe sorgfältig die Lage des Ortes in Ueberlegung gezogen, wo es am zweckmäfsigsten erbaut werden könne, und habe es dann in dem Dorfe erbauen lassen, welches gewöhnlich Starzedel genannt werde. Zum Gedächtnifs und ewigen Heil seiner geliebten Agnes und aller seiner Voreltern übergab er mit Zustimmung seiner Söhne Albrecht und Dietrich dem neuen Kloster alle die Güter, welche innerhalb des Raumes einer Meile von dem Dorfe Starzedel rund herum gelegen sind, und setzte fest, dafs das Kloster hinfort nicht Starzedel, sondern Nova Cella heifsen sollte. Durch diese Stiftung glaubte Heinrich seiner weltlichen Herrschaft Gedeihen zu bringen, dafür eine ruhige und gesegnete Regierung zum Lohne zu erhalten und über diese Gegend Segen zu verbreiten.

Das Kloster hat nicht von Anfang an dort gelegen, wo es sich jetzt befindet. Wir wissen dies aus der Bestätigungsurkunde, welche Kaiser Karl IV. am 30. November 1376 auf die Bitte des Abtes Nikolaus dem Kloster ausstellte. Hier wird gesagt, dafs eine Verlegung des Klosters nach dem Dorfe Slauen, d. i. das heutige Schlaben, stattgefunden hätte. Wenn nun manche Geschichtschreiber gemeint haben, die erste Anlage hätte sich in dem etwa 15 km südöstlich von Guben gelegenen Dorfe Starzeddel befunden, so müssen sie sich vor allem mit der Thatsache auseinandersetzen, dafs die kaiserliche Bestätigungsurkunde angiebt, es handele sich um die Stiftungsurkunde, „welche Heinrich der Erlauchte, Markgraf zu Meifsen, dem Kloster mit den dazu gehörigen Besitzungen ausstellte, nämlich den Dörfern Wellmitz, Steinsdorf, Seitwann, Streichwitz, Schwerzkow, Möbiskruge, Lawitz, welche Güter der Abt und der Convent dieses Klosters von seiner Stiftung an mit allen ihren Grenzen und Gerechtsamen ohne alle Störung besessen hat.“ Alle diese Dörfer, welche hiernach den ursprünglichen Klosterbesitz bilden, liegen mit Ausnahme des entfernteren Seitwann — die Luftlinie zwischen hier und Neuzelle beträgt fast 12 km — rings um das heutige Neuzelle in der Entfernung von einer Meile.

Es bleibt nur die Annahme übrig, dafs Starzedel, seit Heinrich dem Erlauchten Nova Cella genannt, eine inmitten der ursprünglichen Klosterdörfer gelegene alte Ansiedlung gewesen ist, die zu irgend einer und vielleicht sehr frühen Zeit verschwunden sein mufs. Ein solches Verschwinden ist nicht auffällig, vielmehr sehr erklärlich. Die erste Heimstätte der Mönche wird denkbar einfachster Art gewesen sein und im wesentlichen aus einigen roh zusammengezimmerten Hütten bestanden haben, die gegebenenfalls einmal auch zur Vertheidigung bei räuberischen Ueberfällen dienen mufsten. Erst später, als die Einwohner bekehrt und erzogen waren, die Mönche sich wohl auch äufserlich sicher genug fühlten, konnten sie an den Bau eines eigentlichen Klosters denken und sich einen grofsen und freien Bauplatz dafür aussuchen. Mit dem Fortschreiten des Gebäudes siedelten sie dann dorthin über, stellten einen neuen Altar für ihre Reliquien auf und gaben der neuen Ansiedlung im Gegensatz zu dem heidnischen Starzedel den Namen „nova cella“. Je mächtiger Neuzelle wurde, umsomehr trat Starzedel zurück, bis es schliefslich ganz in Neuzelle aufging. Wo die erste Ansiedlung sich befunden hat, ist nicht zu sagen. Es fehlt an jedem geschichtlichen Anhaltspunkte. Dagegen kann mit Sicherheit behauptet werden, dafs die Verlegung in den Jahren 1288 bis 1291 geschehen ist. — Die Wahl des Ortes für die neue Anlage war glücklich. Am Fufse der von

Fürstenberg a. O. nach Süden sich hinziehenden Hügelkette erhebt sich das Kloster, etwa vier Meilen südlich von Frankfurt a. O. und zwei Meilen von Guben entfernt. Diese Hügel, welche vom Scheitel bis zum Fufse jedes Felsenkernes entbehren, sind Anhäufungen gewaltiger Sandmassen, ehemaliger Meeresboden und Dünen, zusammengeschwemmt und zusammengeweht. Im Bogen umschliefsen sie ein weites Thal, welches in alten Zeiten von einer dauernden Ueberfluthung berührt wurde. Die heutigen Elsbrüche des Klosterlandes zeigen die Urnatur der Oderaue, die jetzt als treffliches Wiesenland erscheint. Sandhügel mit unfruchtbaren Gründen und im Vordergrunde das weite Oderthal mit seinen Sümpfen und Morästen, — das war die Gegend, in welcher die Mönche ihre gesegnete Arbeit verrichten sollten. Heute bietet sie ein anderes Bild. Die landschaftliche Schönheit der Umgebung des Klosters, die idyllische Ruhe in Wald und Feld, die reizende Lage der Gärten und der Mühle am Klosterteich, dem in mondheller Nacht auch der Zauber der Poesie nicht fehlt, die fruchttragenden Aecker und die grünen Wiesenfluren in der Oderaue, — das alles sind redende Zeugen von ernster, unverdrossener Arbeit der alten Cistercienser-mönche.

Wir suchen jetzt die Klostergebäude auf und wollen auf dem Rundgange versuchen, sie so zu beschreiben, wie sie einst eingerichtet waren.

II. Neuzelle während und nach der Klosterzeit.

Wir wandern vom Bahnhof hin durch ein tief eingeschnittenes Thal (*h*) dem Sitze der alten Stiftung zu. (Vgl. hierzu den Uebersichtsplan Text-Abb. 2.) Die hochragende katholische Pfarrkirche (*b*), einst die Conventskirche, grüfst uns von ferne. Ein grofses bemaltes Crucifix am Wege erinnert daran, dafs wir uns in einem katholischen Orte befinden. Wir verlassen die Strafse in der Mitte des Ortes, lassen das von Abt Edmundus (1775 bis 1801) erbaute Hospital für arme Männer und Frauen (*i*) sowie die Klostermühle (*f*) rechts liegen und biegen links in eine Allee (*k*) ein, deren uralte Kastanien uns in ihren Schatten aufnehmen. Sie ist im Jahre 1736 vom Abte Martinus angepflanzt. Gleich an der linken Seite steht eine Capelle (*l*), die der Erzählung nach zum Andenken an die hier von den Hussiten erschlagenen Mönche errichtet ist und die noch insofern Interesse hat, als sie derartig schief in den Sumpfboden eingesunken ist, dafs die Mauern einen Winkel von etwa 15° mit der Senkrechten bilden. Sie enthält einen spätgothischen Flügelaltar mit Schnitzereien und wird bei der Procession am Frohnleichnamstage als vierte Station benutzt. Rechts fällt das Auge auf den Klosterteich (*m*), in welchem sich eine Insel befindet, auf der in alter Zeit an Sommerabenden die Mönche zu speisen pflegten, und weiter gehen wir zur linken an einer hohen Steinsäule, mit Unterbau und Capitell aus barocker Zeit, vorüber, die einen Christus in Lebensgröfse trägt. Der Sockel zeigt das Wappen und Schriftzeichen des Abtes Martin, dessen wir bereits als des Schöpfers der schönen Kastanienallee gedacht haben. Abt Martin hat wohl von allen Aebten des Klosters den gröfsten Einflufs auf die bauliche Entwicklung desselben ausgeübt, und seinen Spuren begegnen wir daher überall. Am Ende der Allee steht das Klosterthor (Text-Abb. 3). Es ist geschickt in Sandstein und Putz hergestellt und kann als Beispiel für die Architekturformen gelten, mit denen er als Abt das mittelalterliche Backsteingebäude gemäfs den veränderten Ansprüchen an äufsere Pracht bekleidet hat. Als Bekrönung trägt es die Figuren der Apostel Petrus und Paulus, sowie in Eisen und Stein gebildet das Strahlenauge Gottes. Beim Durchschreiten des Thores gewahren wir zu beiden Seiten Wohngelasse, welche rechts mit dem Kanzleigebäude (*n*), links mit dem Amtshause (*o*) zusammenhängen. Dort war die Wohnung für den Thorwächter, hier das Schulzimmer für die Jugend des Dorfes Schlaben. Heute dienen diese Räume als Wohnung für den Rentamtsdiener. An die Wohnung des Thorwächters schliefst sich unmittelbar ein langgestrecktes Haus, das

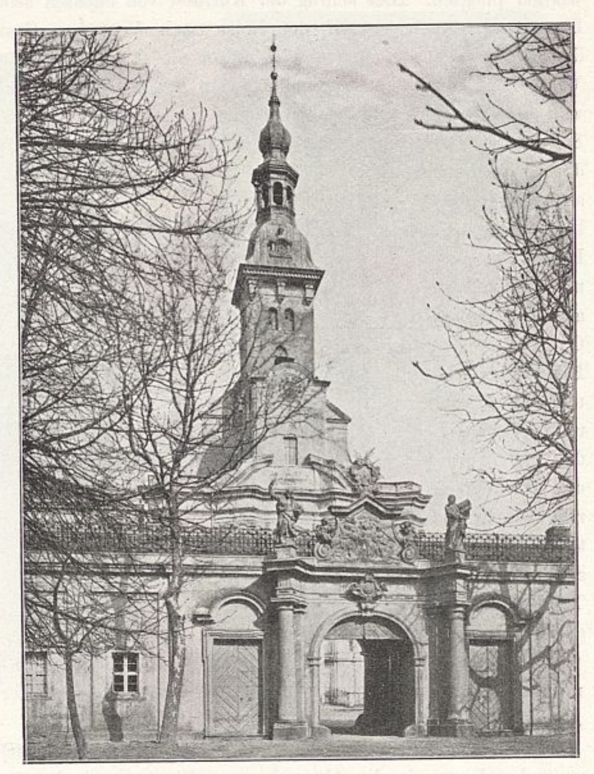


Abb. 3. Klosterthor mit Conventskirche.

Kanzleigebäude (*n*), dessen Ostseite dem Stiftsplatz zugekehrt ist, während die Fenster der Westseite den Ausblick auf den mit Bäumen umsäumten Klosterteich gewähren. Hier wohnte der Stiftscaplan; heute ist das Haus zu Wohnungen für den Rentmeister des Stiftes und für den evangelischen Pfarrer eingerichtet, auch ist die vierklassige Seminarübungsschule hier untergebracht. In der Wohnung des Rentmeisters befindet sich ein geräumiger Saal, an dessen Decke das Wappen des Abtes Conradus mit der Jahreszahl 1723 in Stuckarbeit angebracht ist. Im rechten Winkel stöfst auf die Stiftskanzlei das sog. Kutschstallgebäude (*g*), dessen ehemalige Verwendung durch den Namen angegeben ist. Hier waren zur Klosterzeit auch die Gefängnisse untergebracht. Heute birgt es in sich die einklassige Seminarübungsschule, die Wohnung für einen katholischen Lehrer, die evangelische Parochialschule und die katholische Waisenanstalt. In der Flucht des Kanzleigebäudes, jedoch links vom Thore, liegt das Amtshaus (*o*), welches augenblicklich die Geschäftsräume des Rentamtes ent-

hält. Diese ganze Ecke, das Thorgebäude, das Amtshaus und das sich rechtwinklig an beide anschliefsende Gebäude, welches den grofsen vom kleinen Klosterhofe (p) trennt, öffnet sich nach dem Hofe zu in eine Halle, getragen von runden gemauerten und überputzten Säulen. Das letztgenannte Gebäude, welches die beiden Klosterhöfe von einander trennt, besitzt, wie das Amtshaus, zwei Geschosse und enthält in seinem Innern aufser einer breiten Durchfahrt eine Prachttreppe (sieh die Grundrisse auf Bl. 26, Raum 5), die theils zur Wohnung des Abtes, jetzt Wohnung des Directors, theils zu den im Obergeschofs des Amtshauses belegenen sog. Fürstenzimmern führt, die als Gastzimmer für vornehme Fremde benutzt zu werden pflegten. Hier schlug der Kurfürst von Sachsen sein Lager auf, wenn er auf der Reise nach Warschau Gast des Klosters war. Ueberaus reich waren sie ausgestattet, die Wände mit Stuck belegt, die Fufsböden getäfelt, die Thüren und Möbelstücke mit farbigen Intarsien ausgelegt und mit Schnitzereien versehen, die, wie das polnische Wappen, zu dem hohen Besucher in Beziehung standen. Die Decke war bemalt mit Darstellungen aus der biblischen Geschichte: Elias' Himmelfahrt, Jakob und Esau, Jakob und Rebekka. Leider ist von all den Herrlichkeiten nichts mehr erhalten. Ein Feuer hat alles vernichtet. Text-Abb. 15, der grofse Sommersaal, welcher etwa in derselben Zeit, wie die Fürstenzimmer, errichtet wurde, giebt eine ungefähre Anschauung von der Art der Ausstattung der Räume.

Abb. 5. Ostansicht im 14. Jahrhundert.

Wir wenden uns jetzt dem eigentlichen Klostergebäude (c) zu und gelangen in die Abtswohnung. Sie hat, wie bereits erwähnt, ihren Zugang über die grofse Treppe, liegt im Obergeschofs des Gebäudes und ist mit den Fürstenzimmern durch einen langen breiten Flur verbunden. Links vor dem Eingange lag die Pförtnerstube, hinter diesem zur Rechten (die beiden Eckzimmer 21b und k in Abb. 1 Bl. 26) das grofse Empfangszimmer des Abtes, nach links reihten sich die Wohn-, Schlaf- und Arbeitsräume an, sowie die Abteiküche, die Dienerzimmer, die Privatcapelle des Abtes. Doch haben alle diese Räume nicht immer denselben Zwecken gedient und sind oftmals wohl nach den besonderen Wünschen ihrer jeweiligen Besitzer umgebaut worden, sodafs eine genaue Feststellung nicht möglich und schliefslich auch ohne Bedeutung ist. Indes scheinen die Räume in ältester Zeit gewölbt gewesen zu sein, da die Strebepfeiler an dieser Seite des Kreuzganghofes in das Obergeschofs hinaufreichen. Die Ecke zwischen dem herausgebauten Wirthschaftsflügel und der Westwand des grofsen Saales (jetzt Zimmer, Flur und Treppe) war als Wohnung für den Prior und den Subprior bestimmt, die der Clausur nicht unterworfen war, wie die Zellen der Mönche im Ostflügel.

Unter der Wohnung des Abtes, in der bereits erwähnten Säulenhalle liegt der Eingang zum Klostergebäude (Raum 7). Wir

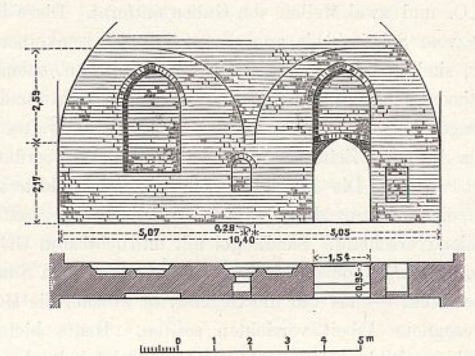


Abb. 4. Ostwand der Aula.

durchschreiten das schwere eisenbeschlagene Portal und fühlen uns mit einem Schlage um einige hundert Jahre in der Zeitrechnung zurückversetzt. Kein Stuck, kein Marmor, nirgends ist eine Spur von Reichthum oder Wohlleben zu erkennen. Wir befinden uns in einem mittelalterlichen Raum, der von spitzbogigen Kappengewölben zwischen Backsteinrippen überdeckt, von glattgeputzten Wänden eingeschlossen ist, und nun noch einige Schritte weiter und nach rechts und links öffnet sich ein geräumiger Kreuzgang um einen rasenbewachsenen Hof. Er bildet den Kern der ersten und alten Klosteranlage und kann wohl als der besterhaltenste und reizvollste Kreuzgang aus mittelalterlicher Zeit im nördlichen Deutschland gelten, der gänzlich aus Backsteinen unter reichlicher Verwendung von Formsteinen hergestellt ist.

Im Jahre 1268 wurde, wie bereits erwähnt, das Kloster gegründet. Es bildete einen der am weitesten vorgeschobenen Posten des Deutschthums im damals noch ganz wendischen Lande. An einen gröfseren Klosterbau konnten deshalb die Mönche nicht eher denken, als bis die heidnischen Einwohner dem Christenthum unterworfen und, soweit thunlich, zu brauchbaren Handwerkern herangebildet waren.

Erster Bauabschnitt.

Als erster und vermuthlich auch einziger Steinbau, der in dieser frühen Zeit gegen Ende des 13. Jahrhunderts entstand, ist eine kleine Kirche anzusehen, die, auf einem Bergabhange gelegen, ganz aus unregelmäfsig gesprengten Granitfindlingen aufgeführt wurde. Die Backsteine dienten einzig und allein zur Bekleidung von Thür- und Fensterleibungen, eine Erscheinung, die auch anderen Ortes fast überall da

auftritt, wo die Bauleute aus einem Lande, in unserem Falle Sachsen, stammen, in dem der Haustein das allein herrschende Baumaterial war und der Backstein höchstens als eine Art Ersatz dafür angesehen wurde. Die wenigen erhaltenen Reste dieser Kirche bilden die Aufsenwand der jetzigen Aula und sind auf der Nordansicht des Gebäudes zu sehen (Abb. 1 Bl. 25). Die Kirche war zweischiffig und vermuthlich mit einfachen Kreuzgewölben auf sechsseitigen Pfeilern überdeckt. (Text-Abb. 4, S. 212, und Schnitt CD Abb. 3 Bl. 25.) Etwa ums Jahr 1300 erhielt die junge Ansiedlung namhafte Unterstützungen. Mönche aus Chorin, andere meinen Lehnin, trafen in gröfserer Anzahl unter Oberleitung eines Abtes

ein Sandberg war, der den Bauplatz nach Süden hin aufs äufserste beengte. Besteigen wir nämlich den Thurm, so bemerken wir auf etwa $^2/_3$ der Höhe ein Spruchband, welches sich als Schmuck um den alten Backsteinthurm herumzog, aus Putz hergestellt ist und folgende lateinische Worte in hohen gothischen Buchstaben trägt:

Ecclesiae loco quo sto cum ambitu toto
Mons fuit hic magnus scripti carminis huius.

Die Technik der Herstellung dieses Spruchbandes erinnert an altägyptische Flachreliefs, indem nämlich auf der ebenen Putzfläche die Buchstaben eingeritzt und die umgebenden Putztheile um einige Millimeter abgekratzt sind, so jedoch, dafs



Abb. 6.



Abb. 7.

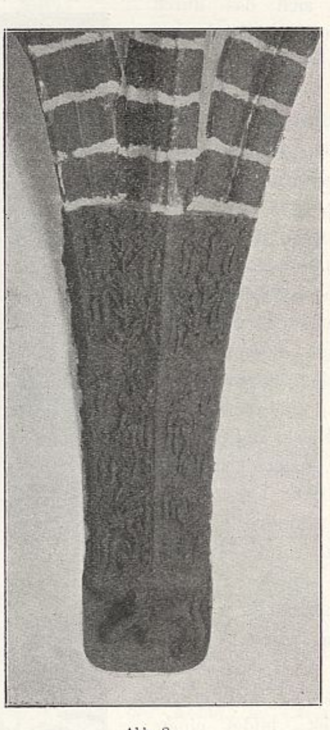


Abb. 8.

Abb. 6 bis 8. Gewölbeanfänger im Kreuzgang (Ostflügel).

Hermann ein, um sofort den Bau eines umfangreicheren Klosters zu beginnen. „O felix Lenin cum tua filia Chorin, ex te sunt orta nova Cella et coeli porta" will ein Geschichtschreiber zu Ende des vorigen Jahrhunderts noch auf einem jetzt verschwundenen Bilde gelesen haben. Als Material hierbei trat diesmal der Backstein in sein Recht, den die neuen Bauleute vom Bau ihrer Mutterklöster her mustergültig zu verwerthen verstanden. Im allgemeinen sollte man annehmen, dafs das neue Kloster in seinen Abmessungen und in der ganzen Anlage ziemlich genau eine Nachbildung eines derselben gewesen wäre. Dem aber ist nicht so. Nur in Einzelheiten, besonders in der Ornamentik ist der Einflufs unverkennbar. Der Grund für diese veränderte Plangestaltung ist der, dafs die bereits bestehende und geweihte Kirche mit in den Bau hineingezogen wurde. Hierdurch war zunächst der Bauplatz für das neue Kloster festgelegt, und da dieser keineswegs eben war, zwang er den Baumeister zu mancherlei Absonderlichkeiten, ganz abgesehen davon, dafs der Platz, auf dem heute die grofse katholische Kirche steht, damals

der Rand des Bandes wieder mit den Buchstaben bündig liegt. — Den Mittelpunkt der neuen Anlage bildete, wie bei allen Klosterbauten des Mittelalters, der Kreuzganghof, 25 m etwa im Geviert grofs, mit seinem in den Hof hinein gebauten Brunnenhäuschen. (Grundrifs vom Erdgeschofs Abb. 2 Bl. 26.) Auf der Nordseite lag die kleine, alte, kirchlichen Zwecken vorläufig noch weiter dienende Kirche (9 in Abb. 2 Bl. 26), die jetzige Aula. Daneben erstand die mit Holzdecke versehene Bücherei (10 in Abb. 2 Bl. 26), der jetzige Musiksaal, in den unteren Theilen, des gleichförmigen Aussehens wegen, ebenfalls aus Granit erbaut, oben aber aus Backstein. Der an diesen Räumen sich entlang ziehende Theil des Kreuzganges war mit einem besonderen Pultdache versehen, der im Osten und Westen des Hofes gelegene Theil dagegen in das Gebäude eingebaut. Der Ostflügel des Klosters barg in seinem Obergeschofs die einfenstrigen Mönchszellen (23 in Abb. 1 Bl. 26), die einen hübschen Ausblick auf die Oderaue und die Klostergärten gewährten, im Erdgeschofs die einarmige Haupttreppe mit dem daneben liegenden Refectorium (jetzt Flur, Raum 13),

zwei Eingänge und den Conventsaal, in welchem die Ordensangelegenheiten verhandelt und die Wahl der Aebte, sowie die Einkleidung der Novizen vorgenommen wurde. Der Raum ist mit drei Kreuzgewölben überdeckt, jetzt allerdings durch Wände in einzelne Zimmer getheilt. Er hat vermuthlich früher eine Apsis besessen. An den Saal schlofs sich die Schatzkammer an. Die ganze Reihe der jetzigen Unterrichtsräume daneben ist erst im 18. Jahrhundert entstanden. Unter dem Refectorium und mit diesem durch die Treppe verbunden lag die Küche, hochgewölbt und mit einem grofsen Rauchrohr ausgerüstet. In dem kleinen, über die Nordfront vorspringenden Theil des Ostflügels befand sich das durch fliefsendes Wasser getriebene Mühlrad (Text-Abb. 5, S. 212). Im Westflügel lagen die uns bereits bekannten Räume, oben die Abtswohnung, unten der Haupteingang, die Pförtnerwohnung und die Apotheke des Klosters aufser einigen kleineren, nicht sicher festgestellten Zwecken dienenden Räumen. Auf der Südseite des Hofes lag nur der mit einem Pultdache bedeckte Kreuzgang. Der dahinter liegende, bereits vorher erwähnte Berg hinderte augenscheinlich den weiteren Ausbau dieses Theiles. Was von diesem ersten Klosterbau noch erhalten ist, bildet einen nicht unwesentlichen Beitrag zu unserer Kenntnifs von der Geschichte des märkischen Backsteinbaues überhaupt. Die reich ausgebildeten Gewölbeanfänger (Text-Abb. 6 bis 8, S. 213) bestehen bis zu der Stelle, wo die Rippen sich ganz von einander ablösen, aus grofsen gebrannten Thonklumpen und zeigen noch die unmittelbare Uebertragung von Hausteinformen auf den Backstein. Die Thüren und Fenster haben gute Verhältnisse, die Profile der Steine sind edel gebildet und geben durch strenge Einfachheit gute Schattenwirkungen. Bis auf die Zellen der Mönche und die Bücherei scheinen alle Räume gewölbt gewesen zu sein.

Zweiter Bauabschnitt.

Den ersten Umbau erlitt das Kloster etwa um die Mitte des vierzehnten Jahrhunderts, als beim raschen Emporblühen der Raum für die vermehrte Zahl der Mönche nicht mehr ausreichen wollte. Die Kirche wurde dabei zum gemeinsamen Speisesaale umgewandelt und durch eine jetzt vermauerte Thür in unmittelbare Verbindung gesetzt mit dem ebenfalls um diese Zeit nach Norden hin angebauten Wirthschaftsflügel. Für eine neue Kirche, die jetzige katholische Kirche (*b*), mufste der Bauplatz aber erst geschaffen werden dadurch, dafs der im Süden des Klosters gelegene Berg beseitigt wurde. Der abgefahrene Sand diente zur Einebnung des Klosterplatzes und zur Umwehrung des äufserst ausgedehnten Klosterteiches. Leider ist es nicht möglich, das Mauerwerk der Kirche des jetzt darüber liegenden Putzes wegen genauer zu durchforschen, doch will es scheinen, als ob im Gegensatz zum Kloster selbst wenig Formsteine beim Bau Verwendung gefunden haben.

Die Kirche ist dreischiffig und erinnert in ihrer Gestalt durchaus an die benachbarten Kirchen von Fürstenberg, Guben und Starzedel. Allerdings besafs sie keine Apsis, sondern war im Osten durch einen hohen Backsteingiebel geschlossen. Die jetzige Apsis stammt aus der Zeit nach dem dreifsigjährigen Kriege. Eine genauere Untersuchung war auch hier nicht möglich.

Abb. 9. Aula, ehemaliges Refectorium.

Dritter Bauabschnitt.

Dies war ungefähr der Bestand an Gebäuden, als vom benachbarten Böhmen her die Hussitenkriege über die Lausitz hereinbrachen. 1429 fiel Guben und gleich darauf auch Neuzelle in die Hände der räuberischen Horden. Abt und Mönche wurden gefangen genommen und grausam verstümmelt, die Gebäude fielen der Plünderung und Zerstörung anheim, und so gründlich ging man dabei zu Werke, dafs aufser einigen Wänden nur noch der östliche Theil des Kreuzganges mit seinen Gewölben und die daranliegenden Räume mit Sicherheit als aus der Zeit vor den Hussitenkriegen stammend angesehen werden können. Bei dem bald darauf beginnenden Wiederaufbau des Klosters erhält der bei weitem gröfste Theil ein spätgothisches Gepräge, während am Grundrifs selbst nichts von Bedeutung geändert zu sein scheint. Der vervollkommneteren Technik und dem Geschmack der Zeit ist es zuzuschreiben, dafs der Speisesaal anstatt der doppelten Reihe von Kreuzgewölben eine einzige grofse auf Rippen gewölbte Tonne als Decke erhält (Text-Abb. 9 und Grundrifs Abb. 2 Bl. 26) und dafs die zerstörte Holzdecke der Bücherei durch ein Rippengewölbe ersetzt wird. Dies bedingte eine Erhöhung

der Aufsenmauer, die aus Backstein ausgeführt wurde und auf Text-Abb. 10 u. 11, sowie auf der Nordansicht des Gebäudes (Abb. 1 Bl. 25) dargestellt ist. Die Profile der Rippen jedoch sind nüchtern und charakterlos, die Kämpfer, aus einzelnen kleinen Theilen bestehend, oft spielend und kleinlich (Text-Abb. 12 u. 13). Dem Ornament fehlt die Frische, und was die sorgfältige Ausarbeitung anbelangt, auch der Fleifs der Frühzeit. Doch sind dies Mängel, die sich an allen Backsteingebäuden aus späterer gothischer Zeit vorfinden. Die nächsten Jahrzehnte verliefen für das Kloster ohne besondere Zwischenfälle, selbst der dreifsigjährige Krieg scheint dem Gebäude als solchem wenig Schaden gebracht zu haben. Um so schlimmer aber wurde das Klostergebiet mitgenommen.


Abb. 10. Wiederhergestellter Fries auf der Nordseite.

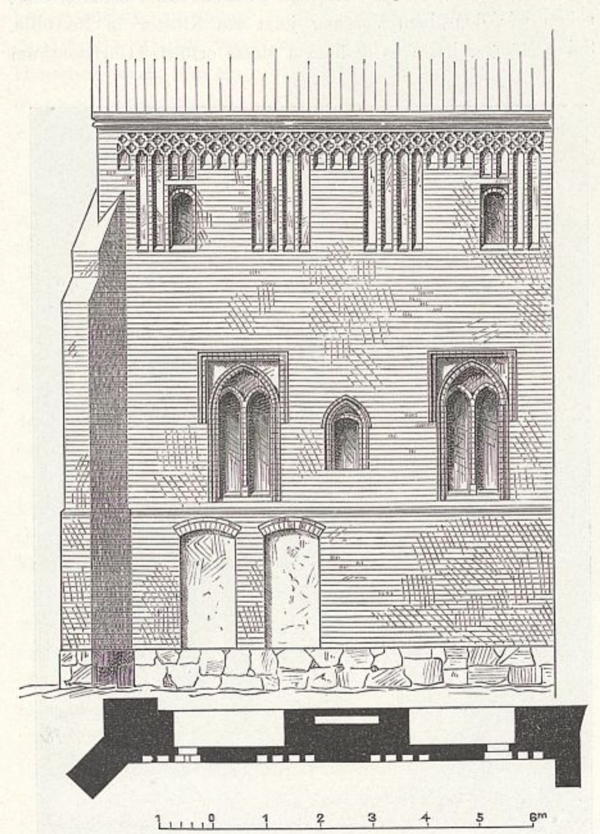


Abb. 11. Westseite am nördlichen Ende des Ostflügels.

Abwechselnd brandschatzten es die Schweden und die Kaiserlichen, ganz gleich, ob sie als Freund oder als Feind erschienen. Als Gustav Adolf nach der Eroberung Frankfurts hier sechs Regimenter zurückliefs, drohte dem Abt Hugo die Gefahr der Gefangenschaft, welcher er sich durch schleunige Flucht entzog. Das Land lag verwüstet. Was das Schwert nicht gefressen, wurde durch Hunger, Elend und Seuchen verzehrt. Die Aebte schwebten in ständiger Gefahr, die in unmittelbare Nähe rückte, als im Jahre 1643 ein österreichisch-sächsisches Corps bei Fürstenberg a. O. von den Schweden besiegt wurde. Das ganze Elend erkennt man an der Thatsache, dafs von den Besitzungen 983 ansässiger Wirthe und 23 Häusler in den Klosterdörfern nur 196 Wirthschaften noch vorhanden waren, mithin 784 Besitzungen wüst lagen. Irgend welche baulichen Veränderungen am Kloster sind deshalb während dieser ganzen Zeit nicht wahrzunehmen. In erster Linie fehlte es wohl an Geld, dann aber wird auch das Bedürfnifs zum Bauen nur gering gewesen sein, da sich die Zahl der Klosterbrüder während der Kriegsjahre bedeutend vermindert hatte. Dies änderte sich aber sehr bald, als nach Beendigung des dreifsigjährigen Krieges mit dem Beginn des neuen modernen Zeitalters in Kunst und Wissenschaft ein jeder sich nach Möglichkeit bemühte, das Mittelalter mit seinen Anschauungen von sich abzustreifen und neue Wege zu suchen, um vorwärts zu gelangen.

Vierter Bauabschnitt.

Wie auf allen Gebieten, hatte auch in der Baukunst das Mittelalter abgewirthschaftet. Der strenge Ernst seiner Werke war dem Geiste der neuen Zeit unverständlich und dieselben deshalb dem Verderben preisgegeben. Was die Zeit im Laufe der Jahrhunderte und die Zerstörung der Kriege nicht erreicht hatten, wird jetzt durch planmäfsige Umgestaltung des Klosters seitens der Aebte im Laufe des 17. Jahrhunderts und das ganze 18. Jahrhundert hindurch zustande gebracht. Die Aebte waren kleine Fürsten geworden, und als solchen genügten ihnen weder die bescheidene Wohnung ihrer Amtsvorgänger, noch für den Prunk der Gottesdienste die einfache schlichte Kirche. Mit dem Ausbau der letzteren wird der Anfang gemacht (Text-Abb. 14 und Abb. 1 u. 2 Bl. 27). Um Platz für Malerei zu gewinnen, wird unter das alte gothische Rippengewölbe eine grofse Tonne aus Holz und Stuck gespannt, mit seitlich einschneidenden Kappen über den Seitenschiffen. Die hohen spitzbogigen Fenster werden in zwei über einander liegende Lichtöffnungen getheilt und theils rundbogig, theils mit einem geraden Sturz abgeschlossen. Kein Backstein durfte sichtbar bleiben, innen und aufsen wird alles überputzt und weifs getüncht oder auch in reichster Weise mit theilweise farbigem Stuck bekleidet. Die alten Pfeiler der Kirche erhalten barocke Capitelle, desgleichen die äufseren Strebepfeiler. Ein mächtiges ausladendes Hauptgesims tritt an die Stelle der alten Dachrinne. Auf den kleinen niedrigen, mit einem Kegel abgedeckten Kirchthurm wird eine hohe, reichgeschweifte Zwiebelspitze aus Kupfer aufgesetzt (Text-Abb. 3). Im und am Klostergebäude selbst sind die Veränderungen nicht geringer. Auch hier wird zunächst

durch den Putz der Charakter des Gebäudes gänzlich verändert. Die hohen gothischen Dächer werden abgenommen, und an ihre Stelle treten flachere Mansardendächer mit geschweiften Dachluken. Der Spitzbogen verschwindet an Fenstern und

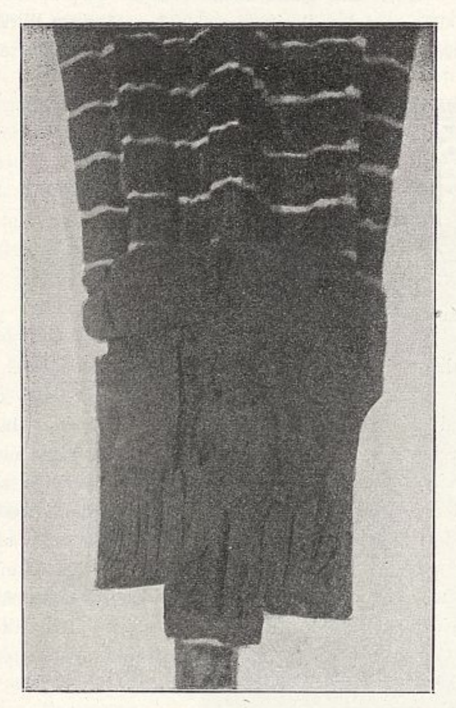


Abb. 12. Gewölbeanfänger im Kreuzgang (Ecke Ost — Nordflügel).

Thüren, selbst die Rippen der Gewölbe scheinen störend gewirkt zu haben, da sie in manchen Räumen abgeschlagen sind. Um Platz zu gewinnen, wird vor die Ostfront eine ganze Flucht neuer Zimmer vorgelegt (vgl. Grundrifs des Erdgeschosses Abb. 2 Bl. 26), im Westen der Aufgang zur Amtswohnung des Abtes durch den Bau des bereits erwähnten grofsen Treppenhauses bedeutend erweitert, diese selbst durch den Bau der Fürstenzimmer usw. den gesteigerten Ansprüchen gerecht gemacht. Die Kirche erhält eine Nebencapelle. Ueber dem Speisesaal entsteht ein grofser Sommersaal, woselbst sich die Brüder zu bestimmten Tagesstunden unterhalten durften. Aus den Fenstern mit den tiefen Nischen hatte man eine weite und schöne Aussicht auf die Oderniederung. Die nicht hohe Decke und die den Fenstern gegenüberliegende südliche, wie auch die westliche Wand waren mit Gemälden aus der Geschichte des Königs David geschmückt (Text-Abb. 15), unter denen als gröfsere Saul und David, David und Jonathan, David mit dem Schwert und Haupt des Riesen Goliath, Davids Bufse zu erwähnen sind. Durch den Bau von Ställen, Dienerwohnungen, eines grofsen Verwaltungsgebäudes, des Waisenhauses, der Sommerabtei und anderer kleiner Nebengebäude entsteht allmählich der grofse und prächtige Klosterhof. Brauerei und Mühle liegen noch aufserhalb desselben. Einigermafsen im unklaren sind wir über die Entstehung der jetzigen ebenfalls aufserhalb des Hofes liegenden kleinen evangelischen Kirche (*a* in Text-Abb. 2). Wahrscheinlich ist sie ums Jahr 1400 gebaut und hat neben der grofsen Hauptkirche als sogen. Laienkirche Verwendung gefunden. Ihren barocken Sckmuck, die Thürme usw. würde sie dann ebenfalls in letztgenanntem Bauabschnitt erhalten haben.

Dafs bei einer so regen Bauthätigkeit auch alle Kleinkünste in ausgiebiger Weise zur Verwendung kamen, ist natürlich. Als besonders erwähnenswerth müssen die eisernen Schmiedearbeiten und die eingelegten sowohl wie die geschnitzten Holzarbeiten genannt werden, von denen noch eine grofse Anzahl, namentlich in den beiden Kirchen, erhalten ist. Desgleichen wurde in Stuckarbeiten ganz bedeutendes geleistet, in der Kunst, sowohl farbigen Marmor nachzuahmen, als gutes schwungvolles Ornament zu modelliren. Weniger hervorragend sind hinsichtlich ihres künstlerischen Werthes die Steinmetzarbeiten, wenngleich auch von diesen manches schöne Stückchen sich sehen lassen kann. Am wenigsten leistete man in der Malerei.

Die Fertigstellung aller dieser neuen Baulichkeiten bezw. Umbauten bedeutet den Höhepunkt in der Blüthezeit des Klosters, zugleich aber auch den Wendepunkt in seiner Geschichte. Gleich wie die alten Ritterorden sich kräftig behaupten konnten, solange sie im steten Kampfe lebten und durch die Unterwerfung heidnischer Völkerschaften genügend Arbeit und Beschäftigung fanden, und anderseits schnell zu Grunde gingen, sobald das ihnen gesteckte Ziel erreicht war, sehen wir denselben Vorgang jetzt am Kloster in Neuzelle. Seine Mission hatte es in hohem Mafse erfüllt. Christenthum

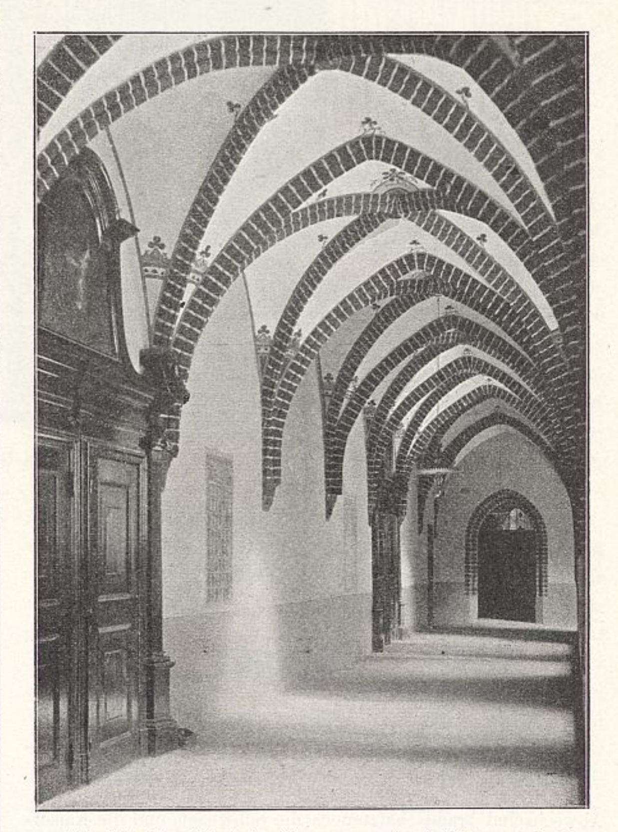


Abb. 13. Nordflügel des Kreuzganges (nach Osten gesehen).

und Gesittung hatte es verbreitet, fruchtbare Ländereien in der Wildnifs hervorgezaubert, auch die Weinreben in diese Gegend verpflanzt, und so konnte es zurücktreten vom Schauplatze der Geschichte, um jüngeren, kräftigeren Elementen

Platz zu machen. Beschleunigt wurde dieser Niedergang durch die allgemeine politische Lage unseres Vaterlandes gegen Ende des 18. und zu Anfang des 19. Jahrhunderts.

Als Preufsen niedergeworfen war und Napoleon bei der Nachricht von dem Andringen der Russen sich entschlofs, nach Posen aufzubrechen, begannen die Truppenbewegungen, welche auch das Stiftsgebiet heimsuchten. Nicht allein die Verpflegung dieser Truppen legte dem Kloster und den Stiftsunterthanen grofse Opfer auf, sondern die Franzosen erzwangen auch die Ablieferung grofser Vorräthe an das Armeecommissariat in Frankfurt a.O. Als der furchtbare Winter im Jahre 1812 die Heere Napoleons vernichtet hatte, schleppte sich ein Theil ihrer Trümmer in regellosen Haufen auch durch das Klostergebiet und hinterliefs als Gegengabe für die erbarmende Liebe ansteckende Krankheiten zurück, an denen eine grofse Anzahl von Menschen starb. Im Befreiungskriege hatten bald Franzosen, bald die Preufsen und Russen Neuzelle im Besitz. Fortwährend marschirten bedeutende Truppentheile hindurch, und als der Waffenstillstand in Kraft trat, befand sich hier ein grofses französisches Corps, welches blieb, bis der Kriegstanz von neuem begann. Bei dem Wiederbeginn der Feindseligkeiten stattete eine Abtheilung des Lützowschen Freicorps dem Kloster einen Besuch ab. Die schnellen Reiter überraschten es während einer Nacht und erbeuteten in der Wohnung des Abtes Oplatus eine bedeutende Menge Geldes.

Mit diesem nächtlichen Besuch scheinen die kriegerischen Unruhen in Neuzelle ihr Ende erreicht zu haben.

Die Schlacht bei Leipzig und der Wiener Congrefs entschieden über das Schicksal Neuzelles endgültig. Die Nieder-Lausitz fiel an die Krone Preufsen, und König Friedrich Wilhelm III. ordnete am 26. Februar 1817 die Aufhebung des Klosters Neuzelle an. Abt und Convent zogen aus, und das Kloster wurde in ein Schullehrerseminar und Waisenhaus umgeschaffen. Man benutzte die Räume zunächst so wie sie vorhanden waren, ohne den Einspruch der Gesundheits-, Feuer- oder Baupolizei fürchten zu müssen.



Abb. 14. Südliches Seitenschiff der katholischen Kirche.

Letzter Bauabschnitt.

Am 2. September 1892, als Lehrer und Schüler zur Feier des Sedantages das Gebäude verlassen hatten, brach plötzlich Feuer aus, das in wenigen Stunden fast das ganze Gebäude vernichtete und mit ihm die meisten Kostbarkeiten aus barocker Zeit, als Entgelt dafür aber die mittelalterlichen Schätze wieder ans Licht brachte. Als der Verbleib des Seminars in Neuzelle und damit der Wiederaufbau der zerstörten Gebäude beschlossen war, richtete die Staatsregierung ihr Bemühen darauf, nicht nur ein Gebäude zu errichten, das allen Anforderungen entsprechen sollte, die zur Zeit an ein gut eingerichtetes Seminar zu stellen sind, sondern auch auf die sorgsame Herstellung und Wiederverwendung aller der schönen und theilweise seltenen Architekturtheile, die das Feuer verschont hatte. Sie sollten später im Gebäude selbst eine ihres Werthes würdige Stelle erhalten.

Um erstgenannten Zweck zu erreichen, mufste zunächst das bisher aus Erdgeschofs und erstem Stockwerk bestehende Gebäude um ein Geschofs erhöht werden. Eine neueren Ansprüchen entsprechende Gestaltung der Lehr- und Wohnräume wäre sonst aus Mangel an Raum nicht möglich gewesen. Die Vertheilung der einzelnen Räume ist nun nach dem Wiederaufbau folgende:

Im Ostflügel liegen die Schulzimmer, Wohnzimmer, Schlafsäle, Waschräume, die Musikübungszellen, kurz alle die Räume, welche für den ausschliefslichen Gebrauch der 96 Zöglinge bestimmt sind. Im Westflügel befinden sich die sieben Dienstwohnungen für die Lehrer und die Beamten des Seminars, sowie die Wirthschaftsküche, im Mittelbau die vier grofsen Säle, die Aula, der Zeichen-, Musik- und Speisesaal. Durch den Kreuzgang sind alle Theile in bequeme Verbindung mit einander gebracht, feuersichere Treppen vermitteln den Verkehr durch die einzelnen Stockwerke. Zum Speisesaale, welcher in das obere Geschofs gelegt werden mufste, führt von den Wirthschaftsräumen aus ein Speiseaufzug.

Im Innern ist bei den alten Räumen des Erdgeschosses besonderes Gewicht auf eine sorgfältige Ergänzung und Wieder-

herstellung der gothischen Backsteinformen gelegt worden. Die Rippen, Gewölbeanfänger, Thür- und Fensterleibungen sind von dem darüber geworfenen Kalkputze befreit, zerstörte und fehlende ersetzt worden. Die ausgedehnten Flure erhielten einen Belag aus Sollinger Sandsteinplatten. Die Zimmer der Dienstwohnungen sind tapezirt, alle anderen mit heller Leimfarbe und bis in Schulterhöhe mit Oelfarbe gestrichen.

Alles Holzwerk der Thüren, Fenster, Dielen, Tische, Schränke ist mit einem Anstrich versehen, welcher die natürliche Maserung des Holzes erkennen läfst. Da die Klassenzimmer genügend grofs waren, konnten die Bänke zweisitzig angeordnet werden. In der Physikklasse sind sie aufserdem noch auf einem nach hinten ansteigenden Boden aufgestellt. Die Heizung des Gebäudes geschieht durch Kachelöfen. Für Entlüftung ist hinreichend Sorge getragen. Vom inneren Ausbau verdient noch besondere Erwähnung die vom Wasserwerk in Frankfurt a. O. ausgeführte Wasserversorgungsanlage. Aus einem 15 cm weiten Abessinierrohrbrunnen wird das Wasser durch eine Heifsluftmaschine zu einem den Tagesbedarf von 7 cbm fassenden Behälter auf den Dachboden gehoben und von dort den einzelnen Zapfstellen zugeführt. Hierdurch war es möglich, Wasserspül-Aborte, Wannen- und Brausebäder anzulegen, sowie sämtliche Küchen, Flure und Wirthschaftsräume mit Wasserleitung zu versehen. Die Einrichtung der Waschräume ist besonders zweckmäfsig insofern, als das gufseiserne Rohrgestänge der Ableitung gleichzeitig den tragenden Theil der eisernen emaillirten Kippwaschbecken und der schiefernen Tischplatten bildet. Holz ist somit bei der Herstellung ganz vermieden worden und ein Verschmutzen einzelner Theile unmöglich. — Die künstliche Beleuchtung der Seminarräume geschieht durch eine von der Allgemeinen Elektricitätsgesellschaft ausgeführte elektrische Kraftanlage, welche in der Klostermühle ihre Aufstellung gefunden hat.

Abb. 15. Ehemaliger Sommersaal.

Im Aeufseren ist der Bau als Putzbau behandelt, mit Gliederungen, die der Spätrenaissance entnommen sind. Nur an der Nordfront sind die alten Backsteinarchitekturtheile, die beim Aufbau unter dem Putz hervorgeholt wurden, theilweise wieder zu ihrer Bedeutung gebracht. — Bei der Ausführung mufste von den erhalten gebliebenen Mauern und Gewölben ein grofser Theil, der schlecht ausgeführt war und zahlreiche Hohlräume aufwies, die mit Schutt ausgefüllt waren, niedergelegt werden. Ebenso waren vielfach die Grundmauern mangelhaft und bedurften eingehender Untersuchungen und nachheriger Verstärkungen. Es mufs jedoch bemerkt werden, dafs derartige Mängel sich fast nur in den Flick- und Ergänzungsarbeiten der letzten Jahrhunderte vorfanden. Um gegen Schäden, die aus derartigen unberechenbaren Umständen erwachsen können, möglichst gesichert zu sein, ist deshalb eine grofse Menge Eisen in Gestalt von Trägern und Zugankern in die Mauern gelegt worden; auch wurde, um die Auflast möglichst zu verringern, zur Dachdeckung englischer Schiefer auf Lattung verwandt.

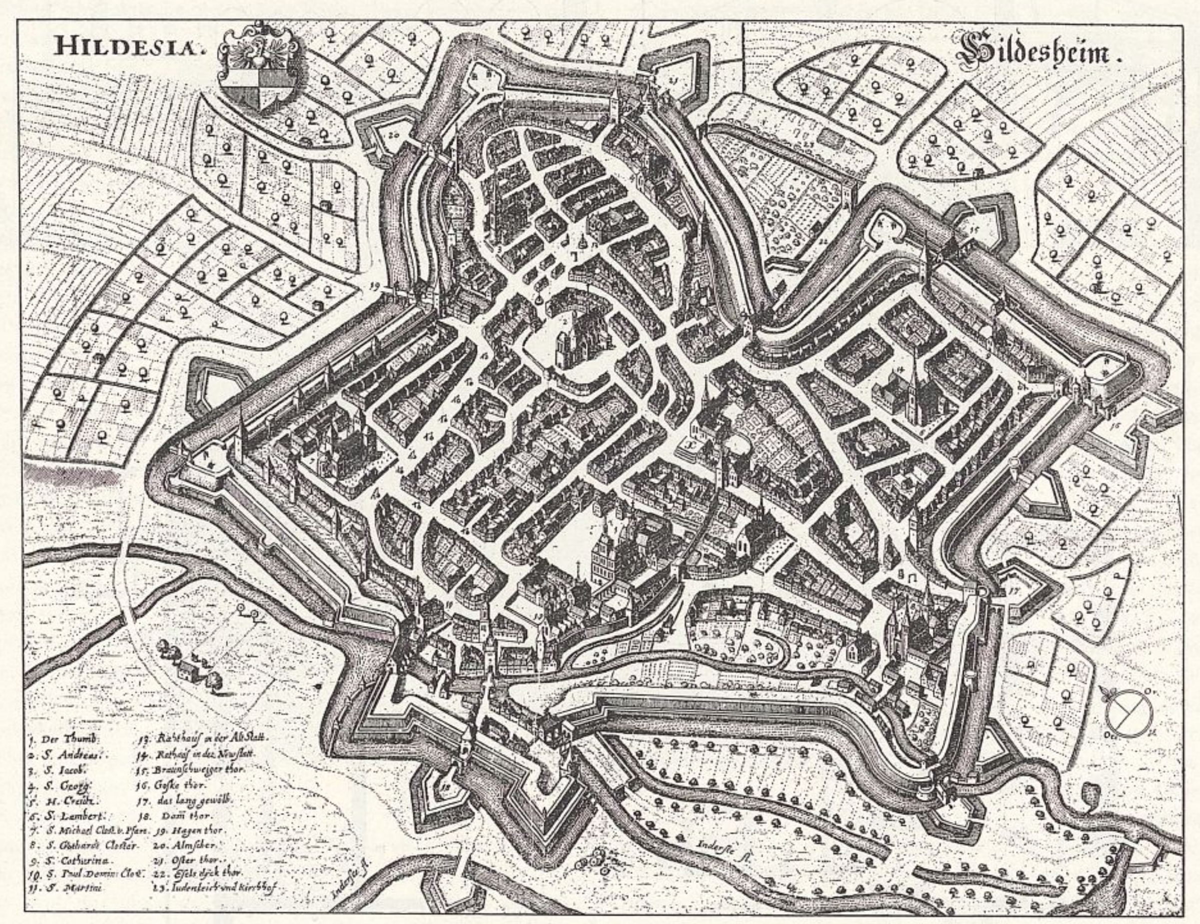
Die Pläne für den Wiederaufbau sind im Ministerium der öffentlichen Arbeiten aufgestellt, die Ausführung ist in den Jahren 1894 bis 1897 durch den Regierungsbaumeister Voigt begonnen und vom Regierungsbaumeister Fischer bis zu seinem im Herbste 1896 plötzlich erfolgten Tode fortgeführt. Die letzten Arbeiten und die Abrechnung des Baues leitete der Baurath Hesse zu Frankfurt a. O. Die Kosten beliefen sich auf 343 000 ℳ, nicht inbegriffen 26 500 ℳ für die Ergänzung der theilweise zerstörten inneren Einrichtung.

Die Kirche zum heiligen Kreuz in Hildesheim.

Von Otto Gerland.

A. Einleitung.

Wenige hundert Schritte östlich vom Domhofe, der alten bischöflichen Burg in Hildesheim, liegt, diese Burg vollständig überragend, die Kirche zum heiligen Kreuz (x in Abb. 1), die aufsen und innen den an italienische Vorbilder anklingenden Stil zeigt. Untersucht man sie aber im Innern genauer, so findet man darin so viele wohlerhaltene übertünchte Spuren älterer Theile, dafs man darin die Ueberbleibsel eines der ältesten Bauwerke Hildesheims wird erkennen müssen. Es verlohnt sich, diesen Spuren nachzugehen.[1])



x jetzige Kirche zum heiligen Kreuz.

Abb. 1. Stadtplan nach Merian.

B. Beschreibung des jetzigen Zustandes.

Die Kirche besteht aus einem etwa 13 m hohen und etwa 6 m i. L. breiten Mittelschiff, das sein Licht von gekuppelten unmittelbar unter der Decke angebrachten rechteckigen Fenstern erhält. An der Nordseite ist ein Seitenschiff von annähernd gleicher Breite angebracht, das etwa 6 m niedriger geführt ist, sodafs sein flaches Dach an die Fenster des Mittelschiffes anstöfst. Es wird von vier ziemlich hoch über dem Fufsboden angebrachten Fenstern mit barocker Umrahmung erleuchtet und besitzt an der Nordwestecke eine Thür mit zwei Heiligenbildsäulen zu beiden Seiten (Abb. 8). Das Mittelschiff ist mit einer flachen geputzten Holzdecke, das Seitenschiff mit einem Tonnengewölbe, in welches Stichkappen einschneiden, überdeckt, beide Schiffe sind durch kräftige Pfeiler von einander getrennt, zwischen denen vier halbkreisförmige Bogen gewölbt sind; ein fünfter an der Ostseite des Schiffes angebrachter Bogen ist vielleicht des stärkeren Widerlagers wegen vollständig vermauert, während das Kämpfergesims aus der Mauer hervorragt (Abb. 4). Anders ist die südliche Seite der Kirche hergestellt. Hier (Abb. 2, 3 u. 9) sehen wir zunächst ein durch vier im Halbkreis gewölbte Bögen nach dem Hauptschiffe geöffnetes, mit einem einfachen Tonnengewölbe bedecktes Seitenschiff, vor dem wir südlich mit Kreuzgewölben geschlossene, durch spätgothische Fenster erleuchtete Capellen finden. Diese sind von der Kirche durch Reste der alten Aufsenmauer, in die Spitzbogen als Zugänge

1) Wenn Mithoff, Kunstdenkmale und Alterthümer im Hannoverschen, 3. Bd., S. 139 von unserer Kirche im allgemeinen gering urtheilt, so kann dies nur daher rühren, dafs er es unterlassen hat, sie einem genaueren Studium zu unterwerfen.

zu den Capellen gebrochen sind, getrennt. Die zwei östlichsten Capellen sind durch Mauerwerk von einander getrennt, während die dritte und vierte durch einen offenen Bogen verbunden sind (Abb. 4). In der Richtung dieses Bogens nach dem Mittelschiffe hin schliefst ein langgestreckter Pfeiler das alte Seitenschiff in seiner ganzen Breite nach Westen hin ab und bildet das Widerlager für ein jetzt nach dem Hauptschiff zu stumpf abbrechendes Stück Tonnengewölbe.[2] (Vgl. Abb. 3, 4 u. 9.) Der Pfeiler ist so stark, dafs darin eine Wendeltreppe eingeschlossen werden konnte, vermittelst deren man zu einer Galerie über dem südlichen Seitenschiffe gelangt. Oberhalb der Stelle, wo das Gewölbe nach dem Hauptschiff zu abbricht, sieht man den Ansatz eines Tonnengewölbes (y in Abb. 9), das früher, mit seiner Achse senkrecht zu der des genannten Gewölbes stehend, vom Eingang der Kirche zu deren Mittelschiff geführt hat. Ueber der Ostseite dieses Gewölbestückes, an dem westlichsten Pfeilerbogen in die Höhe führend, sieht man die Reste des Widerlagers eines Bogens (x in Abb. 9), der sich zwischen Mittelschiff und ehemaliger Vorkirche wölbte und oben im Lichtgaden an eine noch vorhandene Mauerverstärkung der Südwand der Vorkirche (Abb. 9) anlehnte, eine Verstärkung, welche ohne die An-

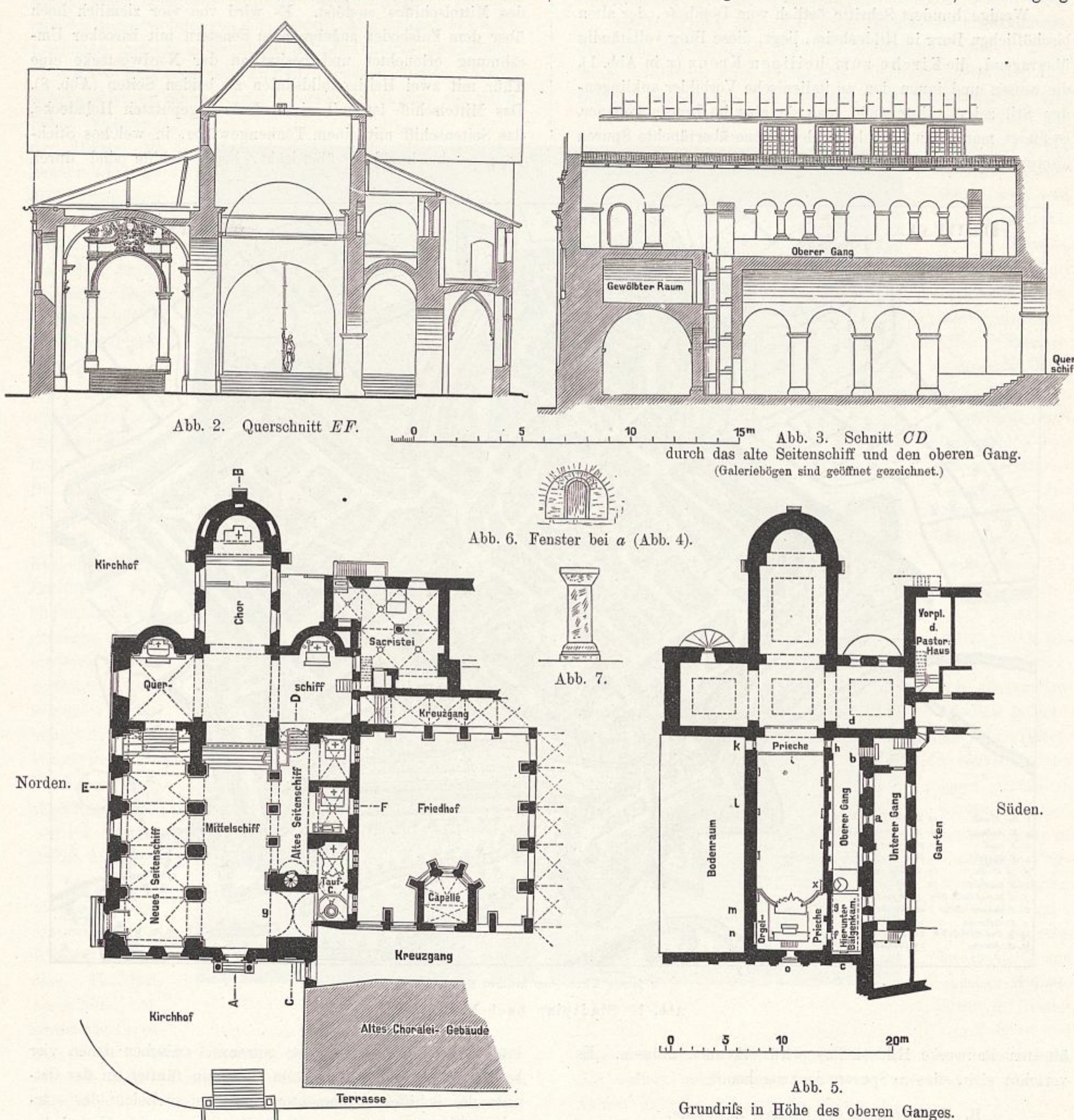


Abb. 2. Querschnitt *EF*.

Abb. 3. Schnitt *CD* durch das alte Seitenschiff und den oberen Gang. (Galeriebögen sind geöffnet gezeichnet.)

Abb. 6. Fenster bei *a* (Abb. 4).

Abb. 7.

Abb. 4. Grundrifs zu ebener Erde.

Abb. 5. Grundrifs in Höhe des oberen Ganges.

2) Dieses Gewölbe scheint Mithoff nicht klar geworden zu sein; vgl. das. S. 139.

nahme, einem solchen Bogen als Widerlager zu dienen, gar keine Erklärung finden könnte (sieh Abb. 5). Die Pfeiler zwischen den das Hauptschiff mit dem südlichen Seitenschiffe verbindenden Bögen sind, wenn nicht bereits 1706 (sieh unter C), so doch spätestens 1797 (in welchem Jahre nach den Capitelprotokollen des Kreuzstiftes in der Kirche Arbeiten verrichtet worden sind, durch die die Orgel mit Kalk und Staub gefüllt wurde) an ihrer nach dem Hauptschiff zugekehrten Seite den Pfeilern des Nordschiffes dadurch ähnlich gemacht worden, dafs man vor die alten gemauerten Pfeiler Vorlagen von Stuck vorblendete. An den drei übrigen, nicht verblendeten Seiten zeigen diese in ihren alten Theilen quadratischen Pfeiler eine einfache geschrägte Basis, deren Fufsplatte jetzt vermuthlich im Plattenbelag des Fufsbodens verborgen ist, und ein ebenso einfaches Capitell, das nur aus Schräge u. Platte besteht (Abb. 2, 3 u. 9). Unmittelbar unter der Decke ist das Hauptschiff beiderseits durch vier gekuppelte Fenster mit wagerechtem Sturze erleuchtet. Von aufsen erkennt man im Mauerwerk noch die Spuren von je vier im Halbkreis geschlossenen grofsen Fenstern. Ueber den Bögen der Scheidewände zwischen dem Mittelschiff und den Seitenschiffen sieht man Spuren von Rundbogenarcaden im Mauerwerk.

Abb. 8.

Auf der genannten Wendeltreppe gelangt man zu der erwähnten Galerie (Abb. 2, 3 u. 5), die sich einst in sieben Bögen nach dem Mittelschiff zu öffnete. Sie sind jetzt vermauert und nur, wie schon angedeutet, vom Mittelschiff aus in Spuren wahrnehmbar. Auf einer 0,90 m hohen Brüstungsmauer mit wagerechter Oberfläche befindet sich in der Mitte ein gröfserer Bogen, rechts und links davon je eine Gruppe von drei kleinen Bögen, die durch kleine gemauerte Pfeiler mit einfachen Capitellen und Basen getrennt sind, erstere denen im unteren Schiff entsprechend, letztere mit flach gerundeter Basis, darunter Platte und Sockel. Nach der Galerie zu sind diese Theile bis auf einzelne Verstümmlungen noch vollständig erhalten (Abb. 2, 3, 7 u. 9). An der Rückseite dieser Galerie sind in der früheren Aufsenwand der Kirche, die jetzt durch den oberen Theil des über den angebauten Capellen angebrachten Daches vollständig verdeckt wird, vier romanische Fenster vorhanden, die, an sich klein, 0,70 m im Lichten breit und 1,40 m hoch, von halbkreisförmig überwölbten Nischen, 1,80 m breit und 2,30 m hoch, mit seitlicher Abschrägung und wagerechter Sohlbank umgeben sind (vgl. Abb. 6). Ueber der Wand, in der die Wendeltreppe angebracht ist, also am Westende der Galerie, ist der Ansatz zu einem halbkreisförmigen Bogen vorhanden, dem am Ostende der Galeriee in solcher erhaltener Bogen entspricht (Abb. 2 u. 3). Der Bogen ist oben wagerecht abgedeckt, und diese beiden Bögen dürften wohl einst unter eine flache Balkendecke gestofsen haben. In der Westwand der Galerie in der ehemaligen Westfront der Kirche ist eine halbkreisförmig überwölbte Thür angebracht (Abb. 5 bei c), die, nach dem Mauerwerk zu schliefsen, schon seit Jahrhunderten vermauert ist; ihr entspricht an der Ostwand der Galerie eine vermauerte Stelle (Abb. 5 bei d), an der einst ein halbkreisförmig geschlossenes Fenster angebracht gewesen ist. Neben diesem ist in der Südwand eine aus späterer Zeit stammende Thür vorhanden, durch die man über den jetzigen Boden oberhalb der Capellen in die Nebenräume der Kirche, wie wir sehen werden, zur einstigen Propstei gehörig, gelangt. Am westlichen Ende der Nordwand der Galerie, westlich von dem genannten Bogenansatz, befinden sich zwei im Halbkreis geschlossene grofse Oeffnungen (Abb. 5 u. 9 bei f u. g), die beide jetzt vermauert sind, deren westlichste aber mit einer kleinen Thür in der Vermauerung versehen ist, durch die man zu der an der Westwand der Kirche angebrachten Orgelempore gelangt, während nicht mehr zu erkennen ist, wohin die vermauerten Oeffnungen ursprünglich geführt haben. Ihnen entspricht wiederum am Ostende der von den vielen erwähnten Bögen durchbrochenen Wand eine ursprünglich im Halbkreis überwölbte Thür, welche jetzt durch eine engere und niedrigere ersetzt ist und durch die man auf einen am Ostende des Mittelschiffes gespannten Bogen gelangt (Abb. 5 h, i). Ueber diesen Bogen (i) hinweg gelangt man zu einer in der Nordwand noch in Spuren erhaltenen gleichfalls halbkreisförmigen Thür (k), an die sich nach Westen zu die Spuren einer Bogenstellung anschliefsen, die der in der Südwand des

Mittelschiffes angebrachten vollständig entspricht, und weiter zu zwei vermauerten rundbogigen Thüren neben der Orgel, die dem auf der Galerie über dem südlichen Seitenschiff angebrachten vollständig entsprechen (Abb. 5 bei k, l, m, n). Die ehemalige Abtreppung der Bogenleibung (i) ist jetzt durch Holzverschalung verdeckt.

Hinter der Orgel ist wenigstens im oberen Theile die alte Westfront der Kirche vollständig erhalten und durch drei hohe abgefaste Spitzbogenfenster des Uebergangsstils (Abb. 5 bei o und Abb. 10) durchbrochen. Das mittlere dieser Fenster ist noch vollständig erhalten, die beiden Seitenfenster sind vermauert. Vor diesen alten Giebel ist die jetzige Front in leicht erkennbarer Weise vorgeblendet und mit eiserenen Ankern mit ihm verbunden. Wie die alte Front im Erdgeschofs war, kann man nicht mehr sagen, nur eine noch (unter C) zu erwähnende Nische dürfte das Ueberbleibsel eines alten Fensters sein; sonst hat das Barock dort, wie auch an der übrigen Front den Sieg davongetragen (Abb. 8).

Alle vorbeschriebenen Theile der Kirche, welche aus früheren Jahrhunderten stammen, sind in gleichem Mauerwerk und Verband ausgeführt und gehören also zusammen.

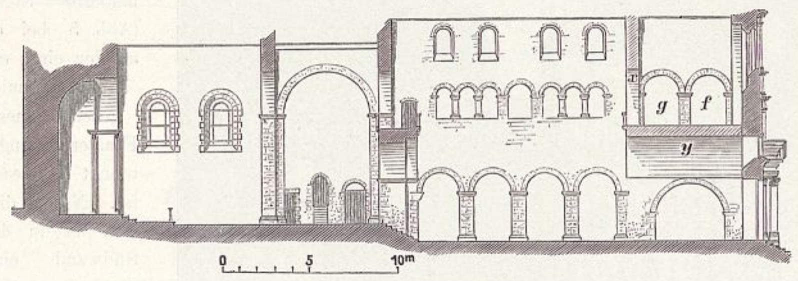


Abb. 9. Längenschnitt *BA*.
(Die heller schraffirten Theile sind nicht mehr vorhanden).

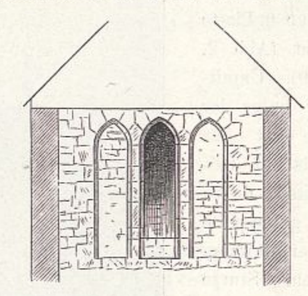


Abb. 10. Inneres Fenster am westlichen Giebel.

Oestlich der erwähnten Kirchentheile schliefst sich nun ein um sieben Stufen erhöhter, mit den bisher erwähnten alten Theilen der Kirche nicht in Verband gemauerter Bautheil an, bestehend aus einer Vierung mit nördlichem und südlichem Querschiff und einem tiefen Chor (Abb. 4 u. 9). An den Ostwänden der Querschiffe ist je eine Apsis angebracht, in deren Mauerwerk man noch ein romanisches Fenster entdeckt, wie auch in der Ost- und Südwand des südlichen Querschiffes je zwei alte romanische Fenster bei dem letzten Umbau wieder geöffnet sind. Im übrigen waren auch diese Theile mit Barockfenstern versehen, die in den Jahren 1898 bis 1899 im Chor durch neue Fenster im romanischen Stil ersetzt sind. Alle diese Theile haben in derselben Zeit eine flache Holzdecke im ursprünglichen Stil erhalten, wie auch die Wände namentlich im Chor durch Professor Schaper in Hannover bemalt sind. Der Chor, der in ganzer Breite einen halbkreisförmigen Abschlufs besitzt, ist gelegentlich der letztgenannten Arbeiten im Innern mit einer Apsis von kleinerem Durchmesser verblendet. Der Chor besteht aus zwei Theilen, dem ursprünglichen Chorquadrat und einer Verlängerung aus dem 18. Jahrhundert. Ueber den vier, die Vierung einschliefsenden Halbkreisbögen erhebt sich ein achtseitiger Glockenthurm im Barockstil (Abb. 8). Vgl. auch Abschnitt C.

An die Südseite der Kirche schliefst sich ein Kreuzgang an, der durch Thüren in dem südlichen Seitenschiffe und am Westende der Südfront zu erreichen ist; über ihn werden wir später (bei E) besonders reden.

Zum Schlufs sei erwähnt, dafs über dem westlichen Gewölbestück eine gleichfalls mit einem Tonnengewölbe bedeckte dunkle Kammer (Abb. 3), wohl die Schatzkammer der Kirche, vorgesehen ist, die von der oben erwähnten Wendeltreppe zu erreichend ist.

Wir wenden uns nun

C. Zur Baugeschichte der Kirche.

Das Annalista Saxo[3]) erzählt vom Bischof Hezilo (1054 bis 1079)[4]): „Ad ultimum in orientali parte civitatis prius domum belli in domum pacis adjuncto eciam novo opere commutavit", d. h. bei seinem Lebensende verwandelte er ein zu Kriegszwecken bestimmtes Gebäude in ein solches für eine friedliche Bestimmung, indem er ein neues Bauwerk hinzufügte. Das Münster, mit dem er ein Chorherrnstift verband, wurde nach derselben Quelle dem heiligen Kreuze und den Aposteln Petrus und Paulus geweiht.[5]) Wir haben es hiernach mit drei Gebäudetheilen zu thun: der nicht beseitigten, sondern nur umgewandelten domus belli, dem hinzugefügten Neubau und den Stiftsgebäuden einschliefslich des Kreuzganges; so sagt denn auch keine Quelle, dafs Hezilo die Kreuzkirche überhaupt erbaut habe (aedificavit, construxit, erexit) und selbst die Relation von 1765 sagt nur, dafs die Kirche von Hezilo fundata sei. Hezilo war ein gar baulustiger Herr, wie er denn den 1061 vollendeten Dom in Hildesheim, das Münster auf dem Moritzberge bei Hildesheim, dessen Vollendung in das Jahr 1068 fällt, und das novum opus an der Kreuzkirche erbaut hat. Es stand ihm dabei der berühmte Architekt Domherr Benno zur Seite, der aber auf den Bau der Kreuzkirche nur noch durch seine Schüler gewirkt haben kann, weil er bereits 1067 Bischof von Osnabrück wurde und als geborener Schwabe der kaiserlichen Partei angehörte, während der Niedersachse Hezilo selbstverständlich auf sächsischer Seite stand.[6]) Gleich bei der Gründung wurde die neue Anlage vom Unglück heimgesucht. Hezilo starb bereits am 5. August 1079,[7]) noch ehe er die Kirche hatte weihen können, wie uns der Bischof Hermann von Hildesheim in einer Urkunde von 1163 erzählt.[8]) Die Weihe wurde daher vom Bischof Burchard II. (Bucko) von Halber-

3) Mon. Germ. I, c.
4) Lüntzel, Geschichte I S. 241 ff.
5) Vgl. auch Lüntzel, Geschichte I S. 251 ff.
6) Bertram, Bischöfe S. 45; Lüntzel, Gesch. I S. 45, 272.
7) Lüntzel, Geschichte I, S. 251.
8) Diplom. Apparat der Univ. Göttingen Nr. 70; damit widerlegt sich die Ansicht Lüntzels S. 261, dafs Hezilo nur wegen Krankheit die Kirche nicht habe weihen können. Vgl. auch Doebner I S. 13.

stadt vorgenommen, der sich gerade zu dieser Zeit in Hildesheim aufhielt, um seinen Freund Hezilo nochmals zu sehen.[9]) Damit hing aber gleichzeitig zusammen, dafs Hezilo Stift und Kirche nicht genügend hatte ausstatten können, wie uns dies gleichfalls die erwähnte Urkunde erzählt, weshalb das Stift während seines ganzen Bestandes mit Geldverlegenheiten zu kämpfen hatte, da die alte domus belli, wenn es auch, wie wir noch sehen werden, wohl ein kirchlich geweihter Raum war, jedenfalls nicht mit selbständigem Vermögen ausgestattet war. Bischof Hermann sah sich deshalb veranlafst, zum Besten der Kirchenfabrik ein Gnadenjahr zu verwilligen, wie auch später zu gunsten einzelner Altäre und 1452 durch den Cardinal Nikolaus von Cusa zu gunsten des Baues und Schmuckes der Kirche[10]) ein Ablafs gewährt wurde.

Die hier in Frage kommenden Gebäude[11]) liegen auf einer abgetreppten Fläche des nach der Domburg zu abfallenden Geländes (Abb. 1, 4, 8). Nördlich von der Kirche zog eine Strafse, der Kreuzbrink, von so geringer Breite hin, dafs sie bereits 1281 erbreitert werden mufste,[12]) aber noch bis 1817 stellenweise nur einspurig war.[13]) Wie noch jetzt in das Gelände eingeschnitten, war sie vielleicht ursprünglich nur die Rinne der nach der tiefsten Senkung zwischen Kreuzkirche und Domburg abfliefsenden Tagewässer und hatte dann wohl als Befestigungsgraben für die domus belli gedient. Oberhalb dieser schon früh mit einer Futtermauer nach der Kirche zu eingefafsten Strafse bis zur Kirche und östlich um diese herum lag der für die zur Kreuzkirche gehörige, aufserhalb der Stiftsgemeinschaft stehende Gemeinde bestimmte Friedhof, der nach einem alsbald nach 1810, dem Jahre der Aufhebung des Stiftes, gezeichneten Stadtplan damals noch vorhanden war, jetzt aber, soweit er nicht zum Verkehr um die Kirche herum dient, als Pfarrgarten benutzt wird. Auf dem Kirchhofe stand nach alter Sitte eine Linde.[14]) Der durch einen Thorweg verschlossene Eingang lag nordwestlich vom Chore der Kirche,[15]) auch befand sich in jener Gegend ein Beinhaus,[16]) und es war daselbst („Tigen unsern kour") eine Seilerbahn, „die garnewinde", angelegt, die z. B. am 30. September 1501 erwähnt wird.[17]) Zu dem die Kirche umgebenden Platze führte ursprünglich nur eine Treppe westlich von der Kirche (auf die wir gleich zurückkommen werden) empor; als bei dem Umbau des nördlichen Seitenschiffes (sieh unten) die nordwestliche Thür gebrochen wurde, legte man eine Treppe von der Kreuzstrafse zu dieser Thür an, die aber 1820 bei Erbreiterung der Strafse wieder beseitigt wurde.[18]) Die an ihren Seiten aufgestellten Standbilder von Heiligen wurden bei dieser Gelegenheit neben die Kirchthür gestellt (Abb. 8). Die erwähnte westliche Haupttreppe (Abb. 4 u. 8) schlofs, wie uns Oldecop erzählt,[19]) an die den Kirchhof umgebende, später beseitigte Mauer an und war oben mit einem Thore verschlossen; sie ist 1820 umgearbeitet worden. Zu ihren Seiten standen früher Standbilder der Kirchenpatrone Petrus und Paulus, die nach Oldecops Mittheilungen[19]) 1548 von der protestantischen Jugend Hildesheims in roher Weise beschädigt und namentlich ihrer Köpfe beraubt wurden; an ihrer Stelle wurden 1603 zwei Barockbildsäulen der genannten Heiligen aufgestellt (Abb. 8). In der Kirche aber, nördlich vom Haupteingange, sind in einer vielleicht aus einem ehemaligen Fenster der früheren Vorderfront hergestellten Nische (vgl. oben zu B) zwei kopflose und auch sonst beschädigte Statuen eingemauert, die einen Petrus und Paulus darstellen und von denen wir nach dem Gesagten wohl annehmen dürfen, dafs sie die alten beschädigten Figuren sind, die bei der Aufstellung der neuen hierher versetzt wurden.

Diese Haupttreppe, früher gradus oder Graden, später die Stiege genannt, wird schon sehr früh erwähnt[20]) und bildet unter diesem Namen geradezu eine Ortsbezeichnung.[21]) Zwischen 1221 und 1222[20]) tadelt eine Urkunde den Unfug der Schüler der Stiftsschule, den sie bei einer noch 1398 vorkommenden[22]) Feier am Feste der unschuldigen Kindlein (28. December), die im Anzünden eines Feuers oberhalb der Treppe (in gradu) oder auf dem Kirchhofe (in cimiterio) bestand, zu dessen besserer Anfachung dadurch verübten, dafs sie Zäune und Thore zur Gewinnung von Brennholz zerstörten, wodurch die Kirche und die Curien in Feuergefahr geriethen, während dabei auch Lebensgefahr, Mord und Todtschlag zu befürchten war. Eine sehr merkwürdige andere Feier stiftete am 15. August 1232 Lippold, Vogt des Moritzstiftes, durch ein Vermächtnifs,[23]) aus dessen Erträgen alljährlich am Tage der Himmelfahrt Christi eine representatio ascensionis domini auf den Treppenstufen vor dem in Procession herbeigezogenen Bischof und Domcapitel und vor der zusammengeströmten Bürgerschaft stattfinden sollte, was das Vorhandensein eines noch vorhandenen freien Platzes unterhalb der Treppenstufen voraussetzen läfst. Der Stifter hatte bestimmt, dafs „exponantur ymagines, quas ab hanc causam incidi feci, et paulatim trahantur funibus de locis suis et sedibus inter gradus." Bertram[24]) versteht dies dahin, dafs in Schnitzwerk angefertigte Bilder bei den Stufen des Chores aufgestellt und an Seilen langsam emporgezogen worden seien, wobei er allerdings hinter die Worte inter gradus das Wort chori einschalten mufs, das im Texte nicht vorkommt. Auch werden wir sehen, dafs vor der Vierung der Kreuzaltar stand, der den Blick auf einen solchen Vorgang gestört haben würde. Ferner aber möchte es auffallend erscheinen, dafs mehrere Bilder, ymagines, in die Höhe gezogen sein müfsten, was doch bei Christi Himmelfahrt nur bezüglich

9) Büchner S. 9, 17, 19.
10) Doebner VII S. 43.
11) Um das Stift herum lagen die hier nicht in Betracht kommenden Curien, in denen die Stiftsherren seit der in unbekannter Zeit erfolgten Aufhebung des gemeinsamen Lebens wohnten. Südlich des Stiftes und zwar aufserhalb der späteren Stadtmauer lag eine Capelle zu Mariä Heimsuchung, in späterer Zeit gegründet.
12) Doebner I S. 183.
13) Acten des Magistrats.
14) Copialbuch Bl. 182.
15) Fabrikregister von 1738/39, 1745/46.
16) Fabrikregister von 1788/89.
17) Copialbuch Bl. 56vo.
18) Acten des Magistrats.
19) S. 284.
20) Doebner I S. 51.
21) So 1378 in Bezug auf ein Haus inter urbem (der Bischofsburg) et gradus sancte crucis, 1365, 1366, 1401 bezüglich eines benachbarten Hauses. — Doebner II S. 261, 131, 132, 133; III S. 13. Oldecop erzählt — S. 307 — zum Jahre 1551, dafs junge Burschen einen Stuhl höhnisch als Kaiserthron bezeichneten und „up der hoge grat tom hilligen Crutze" setzten. — Eine gleiche Bezeichnung führte die zum Michaelis-Kirchhof hinaufführende Treppe, die Michaelis-Grade; vgl. Doebner III S. 255, 318, 449 aus den Jahren 1413 bis 1422.
22) Doebner II S. 568, 569.
23) Doebner I S. 67.
24) Geschichte I S. 234.

der Person des Heilandes der Fall gewesen sein kann. Für Bertrams Annahme spricht allerdings, dafs nach Herzigs Mittheilungen in verschiedenen Kirchen auf dem zum Bisthum Hildesheim gehörigen Eichsfelde am Himmelfahrtsfeste eine Christusfigur in der Kirche in die Höhe gezogen worden ist, während am Pfingstfeste eine Taube von der Decke der Kirche herabgelassen wurde, und so könnte ja hier etwas Aehnliches eingerichtet gewesen sein. Jedenfalls wird man nach dem oben Gesagten aus dem Gebrauche des Wortes „gradus" ohne jeden Zusatz annehmen müssen, dafs die Darstellung oberhalb der Treppenstufen vor der Kirche stattfand, und man darf vielleicht annehmen, dafs die Bilder nach Art der beweglichen Scheiben auf den Schiefsständen vor den Augen der Zuschauer vorübergezogen wurden, um die einzelnen Vorgänge bei Christi Himmelfahrt in zeitlicher Folge nach einander darzustellen, schliefslich aber die Figur des Heilandes in die Höhe gezogen wurde. Ich möchte mich dabei auch daran erinnern, dafs ich 1859 bis 1861 in der Kirche des Franziskanerklosters auf dem Frauenberg bei Fulda der Darstellung des Weihnachtsevangeliums von der Geburt Christi bis zur Anbetung der Könige derart figürlich dargestellt gesehen habe, dafs zeitweise die Figuren und Gruppen umgestellt wurden, die Könige immer näher kamen, bis sie schliefslich im Stalle zu Betlehem anlangten. Auch würde endlich, wenn die Darstellung in der Kirche und nicht auf dem Platze vor ihr hätte stattfinden sollen, kaum noch Raum für das Zusammenströmen der Bürgerschaft geblieben sein, da der Bischof und die Domgeistlichkeit allein schon sehr viel Platz eingenommen haben müfsten.

Dafs oberhalb der Stufen vor der Kirche ein geräumiger Platz vorhanden war, zeigen nicht nur der alte Stadtplan (Abb. 1), sondern es erhellt dies auch daraus, dafs daselbst 1372 eine Versammlung des Kreuzcapitels, des Raths der Stadt, von Gesandten des Bischofs und von Zeugen stattfinden konnte.[25])

Auf der Süd- und Ostseite wurden Stift und Kirche von der Stadtmauer begrenzt, die hier die Altstadt von der Vorstadt „im Brühle" und von der Neustadt trennte. Wann diese Mauer erbaut wurde, ist dunkel, wie auch die Zeit der Anlage der Neustadt. Urkundlich erwähnt wird letztere zum ersten Male 1221.[26]) Man nimmt gemeiniglich an, die Neustadt sei angelegt worden, um den während der Sachsenkriege zur Zeit Kaiser Heinrichs IV. stark gefährdeten Bewohnern der offenen Dörfer in der Umgebung von Hildesheim eine sichere Zuflucht zu gewähren, und man wird dies für richtig annehmen und die Errichtung der Mauer der Altstadt um unsere Kirche herum in dieselbe Zeit, und zwar noch vor 1079, das Jahr der Gründung Hezilos, setzen müssen. Denn 1089 belagerte Markgraf Ekbert von Meifsen Hildesheim ohne Erfolg.[27]) Hätte damals das Kreuzstift aufserhalb der Stadtmauer gelegen, so wäre es unfehlbar ein Raub der Flammen geworden, so aber wird gar nichts derartiges berichtet, auch ist nicht die geringste Spur einer Erneuerung an der Kirche aus dieser Zeit zu sehen. Es mufs deshalb das Stift innerhalb der festen Mauern gelegen haben und von den beiden vorliegenden Städten, der Alt- und Neustadt, gedeckt worden sein, und so mufs es sich bereits 1079 verhalten haben, da Bischof Hezilo sonst nicht darauf hätte verfallen können, die ziemlich weit vor die Festung vorgeschoben gewesene domus belli in eine domus pacis, besetzt mit friedlichen Stiftsherrn, zu verwandeln. Es ist dies für die Gründung Hezilos von grofser Bedeutung.

Hören wir nun über 200 Jahre lang nichts Baugeschichtliches bezüglich unserer Kirche, so mufs doch in der Zeit des Uebergangsstils an der Vorderfront eine Veränderung stattgefunden haben, weil anders die Gruppe der drei spitzbogigen Fenster an der Westfront (Abb. 10) nicht zu erklären wäre.[28]) Wir werden sehen, dafs 1184 das südlich von der Kirche stehende alte Propsteigebäude niedergelegt und an seiner Statt ein Neubau im Uebergangsstil erbaut wurde. Wir müssen annehmen, dafs bei der Niederlegung dieses mit der Kirche verbundenen Gebäudes die Vorderfront der Kirche in Mitleidenschaft gezogen und deshalb theilweise erneuert worden ist, wobei die genannten Fenster entstanden und die Verbindungsthür der Südempore (Abb. 5 bei c) und der alten nun beseitigten Propstei vermauert wurde. Dann beschränkt sich Jahrhunderte lang die Baugeschichte auf die Mittheilung der Errichtung der einzelnen an die Kirche angebauten Capellen. Die erste derselben war der Mutter Anna und der heiligen Landgräfin Elisabeth geweiht, die „in parte aquilone" der Kirche,[29]) also an deren Nordseite, „in cimiterio", d. h. auf dem Kirchengrundstücke erbaut und der als „corpori ecclesie sancte crucis annexe",[30]) also als eines Anbaues der Kirche gedacht wird. Sie wurde 1287 gegründet[31]) und war für die Aufbahrung der Leichen der Vicare, der Schüler und der Hausgenossen der Stiftsherrn bestimmt.[32]) Bald darauf wurden in der Richtung von Osten nach Westen angelegt eine Capelle, deren Heiligen wir nicht kennen, die Capelle aller Heiligen und endlich die mit dem Altar der Schutzheiligen des Domes Epiphanius, Bernward und Godehard.[33]) An der Südseite begann die Capellenanlage 1321 mit der des heiligen Pankratius, der 1327 die benachbarte Laurentiuscapelle, dann die eines nicht bekannten Heiligen und endlich die 1405 bereits vorhandene der Heiligen Cantius, Cantianus und Cantianilla (altare Cantianorum) folgte.[34]) Die Aufsenwände dieser Capellen wurden im 15. Jahrhundert in eine einzige Wand umgeschaffen,[35]) wobei auch vielleicht die Capellen neu eingewölbt wurden; an der rohen Ausführung der Wand und der darin befindlichen Fenster sieht man, dafs es an Geld mangelte, um etwas Besseres herzurichten, dafs der Umbau aber unbedingt nothwendig war; aus Sparsamkeitsrücksichten liefs man, wo es anging, die alten Eckquader der ehemaligen Capellenbauten stehen.

Nun schweigt die Geschichte der Kirche bis zu den Stürmen der Reformation, die wir zum Theil schon berichtet haben. 1542 bei Einführung des evangelischen Glaubensbekenntnisses wurde in der Kreuzkirche der öffentliche Gottes-

25) Doebner II S. 210.
26) Doebner I S. 44.
27) Bertram, Geschichte I S. 126.

28) Ein ganz gleiches Schicksal haben in der Uebergangszeit die mittleren Fenster im oberen Thurmgeschofs von Hezilos Dombau gehabt, Bertram, Geschichte I S. 8 und S. 115.
29) Doebner IV S. 699.
30) Doebner I S. 237.
31) Doebner I S. 206, 209, 226.
32) Doebner I S. 218.
33) Doebner III S. 699, I S. 520, 521; II S. 317; Krätz S. 6.
34) Doebner I S. 402, 428, 429, 520, Krätz S. 6.
35) Lüntzel Geschichte II S. 602.

dienst verboten, ein solcher bei verschlossenen Thüren aber gestattet.[36]) 1544 wurde auch dieser nicht öffentliche Gottesdienst verboten,[37]) 1546 wurden dem Stift die Siegel, Schlüssel und Register abgenommen;[38]) nach einer gleichzeitigen Mittheilung[39]) wurde, um die Herausgabe dieser Sachen zu erzwingen, das Capitel in der Capitelstube eingeschlossen, während die Bürger die ganze Nacht Feuer in der Kirche unterhielten, sangen, tranken und sich wild geberdeten, wobei sie mit Schlag- und Schufswaffen versehen waren. 1547 wurde bestimmt, dafs Justus Jonas in der Kreuzkirche allen in Hildesheim anwesenden Geistlichen die Briefe Pauli erklären sollte, wozu ihm in der Kirche ein Katheder errichtet wurde, da die Stiftsherren auf dem Chore der neuen Lehre nicht zufielen. Während des elften Vortrages sagte dem Jonas der Famulus etwas ins Ohr — vermuthlich über die Siege des Kaisers gegen die schmalkaldischen Verbündeten —, worauf Jonas sagte: „Herren, ich befehle euch Gott und die Kirche“ und sofort Kirche und Stadt verliefs.[40]) 1548 nach Annahme des Interims wurde die Kirche zurückgegeben.[41]) Nach der Einnahme Hildesheims durch die Braunschweiger und Schweden, 1634, wurde die Kirche abermals geschlossen und 1637 zur lutherischen Garnisonkirche bestimmt, 1641 aber den Katholiken zurückgegeben.

Durch solche mifslichen Umstände und durch das Elend des dreifsigjährigen Krieges erklärt es sich, dafs das Stift an seiner Kirche nichts thun konnte, um diese vor Verfall zu behüten und dafs dann 1703 in den „newen gewölben“, womit nur die Capellen der Nordseite im Gegensatz zu dem überwölbten ehemaligen Seitenschiff gemeint sein können, da man nur auf der Nordseite baute und also nur dort zwischen alten und neuen Gewölben unterschieden werden konnte, dafs also in diesen Gewölben sich Risse zeigten, die nach einer angestellten Untersuchung viel gefährlicher waren, als man anzunehmen geneigt war. Es war also keineswegs Neuerungswuth, die zum Umbau der Kirche drängte. Man befragte Sachverständige, erwog, ob „die zwei kleinen naves“, d. h. das alte Seitenschiff und die Capellenreihe in eins gebracht oder ob es bei dem bisherigen Zustande belassen werden solle, und entschied sich, nachdem die Ansichten anfangs getheilt waren, für das erstere; die Frage, ob die Gewölbe aus Stein oder aus Holz und Stuck hergestellt werden sollten,[42]) wurde zwar der gröfseren Dauerhaftigkeit halber in der ersten Richtung bejaht, aber doch in der zweiten ausgeführt. Am 19. April 1704 wurde berathen,[43]) ob „das Oberwerk“ bis ans Dach stehen bleiben oder aber abgenommen werden solle, was sich, da die Capellen ein oberes Geschofs nicht hatten, nur auf die alte nördliche Seitenwand der Kirche beziehen konnte, und man beschlofs, dem Obertheil stehen zu lassen, die unteren Theile aber stückweise abzunehmen und neue Bögen zu setzen. Dadurch ergab sich dann der jetzige Zustand, dafs über den neu gebauten Bögen die Spuren der alten, über dem nördlichen Seitenschiff angebracht gewesenen Bogenstellung erhalten geblieben sind. Die oberhalb dieser Bögen im Lichtgaden angebracht gewesenen Fenster beschlofs man gleichzeitig durch neue mit wagerechtem Sturz zu ersetzen. Die Spuren der alten im Halbkreis geschlossenen Fenster sind aber, wie schon gesagt, noch vollständig erhalten. Der Bau wurde einem Italiener Namens Peter übertragen, der, wie wir unter B sahen, das Innere der Kirche möglichst gleichmäfsig herstellte und 1706 den Bau vollendete. In diesem Jahre wurde die Holzdecke mit Vouten und mit Stuck bekleidet in der Mariencapelle, dem nördlichen Querschiff, hergerichtet und das Dach mit Kupfer gedeckt. Diesen Arbeiten folgte noch die Herstellung der neuen Front an der Westseite, die der Kirche ein einheitliches Aeufseres geben sollte und nach der über der Hauptthür angebrachten Inschrift 1712 fertig gestellt wurde (Abb. 8). Damit waren nun auch die Mittel des Stiftes erschöpft,[44]) und es war diesem infolge dessen glücklicherweise nicht möglich, auch noch die Südseite der Kirche umzubauen,[45]) die uns dadurch erhalten worden ist. Die Heiligenstandbilder vor der Kirche wurden mehrfach frisch geweifst und vergoldet.[46])

Dann aber begann sich der Thurm auf der Vierung als baufällig zu zeigen, vielleicht von dem Neubau der nördlichen Kirchenseite beeinflufst. Laut Capitelbeschlufs vom 21. October 1761 wurde daher dem Opfermann bedeutet, „des Thurms Baufälligkeit halber die beyden grofsen Glocken nicht mehr zu läuten“[47]), und man begann für Mittel zum Neubau zu sorgen. 1774 wurde der Thurm durch Sachverständige untersucht und festgestellt, dafs man wegen dessen Baufälligkeit den Gottesdienst in der Kirche nicht mehr ohne Lebensgefahr abhalten könne.[48]) Wegen Geldmangels zog sich die Sache aber noch bis 1781 hin, bis man endlich mit dem Bau unter Leitung des Majors Du Plat beginnen konnte.[49]) Da tauchte 1788 der Plan auf, in Verbindung mit dem Thurmbau auch den Chor und den Hochaltar umzubauen,[50]) wozu Du Plat ebenfalls einen Rifs vorlegte und den Auftrag erhielt, den er 1790 vollendete. Hierbei wurde der Chor um 20 Fufs, etwa 6 m, nach Osten verlängert. Diese Umbauten kosteten alle zusammen einschliefslich aller Nebenkosten, wie Umgufs der Glocken, Weihe des Altars usw. 13 868 Thaler 9 Mariengroschen 2 Pfg. oder 41 604,76 ℳ. Das Bauwerk gefiel aber so, dafs Bischof Egon in seiner Relation von 1790 sagt,[51]) dafs es „jucundum prospectum cum majestate in omnem plateam effundit“, d. h. die ganze Umgebung in majestätischer Weise erscheine.

D. Folgerungen aus den Darstellungen zu B und C.

Da Hezilo die vorhandene domus belli nicht beseitigt, sondern nur unter Hinzufügung eines Neubaues in eine domus pacis verwandelt hat, so fragt es sich zunächst, was wir unter der domus belli zu verstehen haben, mit Bertram[52])

36) Lüntzel, Annahme des evang. Glaubensbekenntnisses S. 42.
37) Oldecop S. 233.
38) Oldecop S. 284.
39) Lüntzel, Annahme des evang. Glaubensbek. S. 104.
40) Oldecop S. 261.
41) Oldecop S. 284.
42) Protokolle des Kreuzcapitels Nr. 14.
43) Wie vor.

44) Protokoll des Kreuzstiftes Nr. 14 (1706) S. 3.
45) Nach einer Mittheilung bei Krätz S. 3 sollte der Umbau der Südseite 4000 Thaler (12000 Mark) kosten.
46) Fabrikregister von 1748/49, von 1772/73.
47) Protokoll 91.
48) Wie vor.
49) Fabrikregister 19 betr. den Thurmbau 1787—1789.
50) Protokolle vol. VI 1788 Dec. 15.
51) S. 368.
52) Geschichte I S. 118.

ein burgartig angelegtes Wohnhaus oder etwas anderes. Im Hinblick darauf, dafs wir trotz des Reichthums unserer Quellen für die Zeit des romanischen Baustils nicht die geringste Nachricht über einen Umbau der Kirche besitzen, dafs das Querschiff mit dem Hauptschiff nicht, wie dies mit den Seitenschiffen und der alten Front, in Verband gemauert ist, und dafs wir in der eigentlichen Kirche sehr alte Bautheile vor uns haben, neige ich mich der letzten Ansicht zu und nehme an, dafs die domus belli auch ein kirchlich geweihter Raum gewesen sei, der aber gleichzeitig als Festungswerk diente. Hierzu führen mich weiter folgende Betrachtungen.

Die kirchlichen Einrichtungen bei Einführung des Christenthums sollten nicht blofs dessen Ausbreitung, es sollten die baulichen Anlagen nicht allein liturgischen Zwecken dienen, sondern daneben sollte das Kirchengebäude und dessen Umgebung auch zu einem Zufluchtsorte für das Volk in jeglicher Bedrängnifs, auch in leiblichen Nöthen, werden und der Bevölkerung die Mittel an die Hand geben, auch selbst etwas für sich zu thun, sich selbst seiner Haut zu wehren.[53]) Städte und Dörfer legten die Kirchengebäude meist auf die überhöhte Angriffsstelle, hier deckte sie durch ihre hohe und breite Masse einen grofsen Raum hinter sich, hier imponirte sie dem Angreifer und nöthigte ihn zu förmlichen Belagerungen, zu zeitraubenden Vorrichtungen, die Kirche wird durch einen massiven Thurm verstärkt, steht inmitten des ummauerten Friedhofes, dessen Eingangsthür der Thurm flankirt. So bildete die ganze Anlage eine Citadelle als letzten Zufluchtsort, und der Thurm mit der Kirche ist dessen Bergfried. Auch lief wohl die Absicht mit unter, den Schutzheiligen mit in das Kampfinteresse zu ziehen und die Scheu des Angreifers vor der Schädigung des heiligen Ortes selbst als Schild zu benutzen. „Das Christenthum mufste auf den Gottesbegriff der Germanen, d. h. auf das Motiv der Kraft gestützt werden", sagt Seefselberg,[54]) wie uns dies Winfried beim Fällen der Donnareiche zu Geismar zeigt. Die ältesten Kirchen mufsten deshalb diesem gleichen Grundsatze dienen, wie uns v. Cohausen und Seefselberg zeigen; namentlich letzterer nimmt die Doppelkirchen als Vertheidigungswerke in Anspruch, wodurch es ihm gelingt, für diese sonst unerklärliche Form eine vollständig befriedigende Erklärung zu geben.[55]) In der Unterkirche sieht er den Aufenthaltsort der hierher zurückgezogenen Gemeinde, der zugleich als Kirche dient, der obere Raum ist Zeughaus und letzter Zufluchtsort für den Fall, dafs die Unterkirche genommen sein sollte; um das Dach läuft ein Zinnenkranz (als dessen weitere Entwicklung v. Cohausen die Zwerggalerieen der romanischen Kirchen ansieht), aus der Mitte oder später daneben erhebt sich der Wachtthurm. Wie viel Kirchthürme auch aus späterer Zeit mehr den Eindruck eines Wachtthurmes als den eines Theiles des Kirchengebäudes machen, brauche ich hier nicht hervorzuheben; ich will nur beispielsweise darauf hinweisen, dafs noch im 14. und 15. Jahrhundert die für meine kurhessische Heimath geradezu typischen schweren viereckigen Kirchthürme mit den vier zum Auslugen eingerichteten Eckthürmchen erbaut worden sind.

Solche Vertheidigungswerke waren auch für Hildesheim nöthig; denn ganz abgesehen von den anfänglichen Kämpfen gegen die noch nicht völlig bekehrten Sachsen, finden wir auch noch später Bischöfe in der Vertheidigung ihres Landes begriffen. Bischof Marquard fiel 880 im Kampfe gegen die bis Hildesheim vorgedrungenen Normannen,[56]) und auch Bernward mufste noch 994 gegen sie kämpfen.[57]) Auch die Godehardskirche macht auf ihrem Hügel und mit ihrem nach aufsen abgeschlossenen, von Thürmen beherrschten Gebäude mehr den Eindruck einer abstofsenden Festung als den eines die Gemeinde zum Eintritt einladenden Gotteshauses, und wir wissen, dafs sie und die damals auch noch aufserhalb der Stadt gelegene Sültekirche 1331 von der Bürgerschaft zu Festungen eingerichtet worden sind.[58]) Auch die Michaeliskirche nennt Lüntzel[59]) ein „detachirtes Fort". Die Kreuzkirche aber insbesondere liegt in derselben Höhe wie die den höchsten Punkt der ältesten Stadt einnehmende Andreaskirche und war mit dieser in frühester Zeit durch einen Wall, dessen Namen noch jetzt in dem der Strafse Kläperhagen fortlebt, verbunden. So wird unsere domus belli der Sammelpunkt für die (erst während der Sachsenkriege unter Heinrich IV. in die Stadt gezogenen) Umwohner der Stadt gebildet haben und war, wie wir schon sahen, überflüssig, seitdem die Stadt erweitert war. So glaube ich denn in den alten drei Schiffen der Kreuzkirche mit ihrem oberen Umgange, deren Erbauungszeit uns derzeit noch unbekannt ist, die aber schon vor Anlage von Querschiff und Chor vorhanden gewesen sein müssen, weil diese dem alten Bau nur zugefügt wurden, und die nach den baugeschichtlichen Mittheilungen auch nicht später erbaut sein können, eine solche alte Doppelkirche erblicken zu sollen, deren Eigenschaft als Vertheidigungswerk ausdrücklich durch die Bezeichnung domus belli anerkannt wird. Etwas Gleiches wird sich nicht allzu häufig erhalten haben.

Wir haben es in der Kreuzkirche unzweifelhaft mit einer Empore zu thun, die sich um alle vier Seiten des Mittelschiffes herumzog, mit einem ambitus, der als superior ambitus ecclesiae in einer Urkunde von 1376 ausdrücklich erwähnt wird.[60]) Dafs hiermit nicht ein Kreuzgang südlich der Kirche gemeint sein kann, folgt nicht aus der Bezeichnung sup. amb. ecclesiae, weil auch der obere Kreuzgang östlich des Domes als ambitus superior ecclesiae Hildensemensis bezeichnet wird,[61]) wohl aber daraus, dafs er superior ambitus genannt wird, also ein solcher, der höher als ein anderer Umgang gelegen haben mufs, während wir unter E sehen werden, dafs der Kreuzgang nur eingeschossig gewesen ist. Es folgt aus dem Gesagten, dafs die Kirche eine Oberkirche gehabt haben mufs, in der man ringsum gelangen konnte. Vollständig erhalten ist hiervon nur die Emporenkirche der Südseite, die der Nordseite nur in den deutlichsten

53) v. Cohausen S. 239, 243.

54) S. 80 ff.

55) Bisher war man über die Natur der Doppelkirchen, die namentlich mit den Emporenkirchen in späteren, besonders in protestantischen Kirchen nichts gemein haben, nicht recht klar. Vgl. Müller und Mothes I S. 336, wo die Obergeschosse der Doppelkirchen als Umgänge bezeichnet werden.

56) Lüntzel, Geschichte I S. 36.

57) Lüntzel, Geschichte I S. 140.

58) Bertram, Geschichte I S. 327.

59) Geschichte I S. 365.

60) Doebner II S. 213, 216.

61) Doebner II S. 156 (158), S. 181 (182).

Spuren, ferner zwischen beiden der sehr merkwürdige, vielleicht einzigartige Gang über dem vor der Vierung angebrachtem Bogen (Abb. 5 bei i, Abb. 11). Daſs aber auch an der Westseite da, wo jetzt die Orgel angebracht ist, eine Verbindung der beiden Längsarme durch eine Empore bestanden haben muſs, dafür spricht nicht nur der erwähnte Gebrauch des Wortes ambitus, sondern das folgt auch mit zwingender Nothwendigkeit aus verschiedenen Bauresten. Zunächst folgt es aus dem Vorhandensein der beiderseitigen doppelten vermauerten Thüröffnungen (Abb. 3, Abb. 5 f, g, m, n und Abb. 9), die doch zu irgend einem Raume geführt haben müssen. Sodann spricht dafür der Gewölbeansatz an der Stirnseite des noch vorhandenen Tonnengewölbes (Abb. 9), aus dem wir schlieſsen müssen, daſs sich hier ein Gewölbe von der Breite dieses Tonnengewölbes und dessen Widerlagern befunden haben muſs. Durch Construction eines Halbkreises erhalten wir dann einen Scheitelpunkt dieses Gewölbes, der, dem noch näher zu besprechenden Bogen an der Ostseite der Kirche an Höhe gleich, einen Fuſsboden trug, zu dem genau die erwähnten, jetzt vermauerten doppelten Thüröffnungen von den Seitenemporen führten (Abb. 9). Da dieses Gewölbe nun an der Nordseite ebenfalls ein Widerlager haben muſste wie an der Südseite, so wissen wir nunmehr, daſs das Tonnengewölbe, das wir jetzt anscheinend zwecklos auf der Südseite erblicken, sich an der Nordseite der Kirche wiederholt habe, wo in seiner Ostwand eine zweite Wendeltreppe zur (nördlichen) Empore angebracht gewesen sein dürfte. Wir erhalten dann in dem der Kirche vorgelegten Tonnengewölbe eine Vorkirche, auf deren Bedeutung wir weiter unten zurückkommen werden. Abgeschlossen nach der Kirche zu aber wurde diese westliche Empore durch den dem jetzigen Triumphbogen in der Höhe entsprechenden Bogen (x in Abb. 5 u. 9), von dessen Widerlager wir die Spur oben feststellen konnten. Diese Westempore bildete dann einen geräumigen Aufenthaltsort (vgl. unten) und diente als Verbindung zwischen den beiden Längsemporen. Sie wird die Stelle sein, wo die oben S. 235 erwähnte Urkunde von 1372 aufgenommen worden ist,[62]) an deren Schluſs es heiſst: „Acta sunt hec in superiore ambitu ecclesie sancte crucis Hildensemensis“ und in der mehr als 17 hervorragende Männer als anwesend aufgeführt werden. Es muſs danach dieser ambitus an irgend einer Stelle eine gröſsere Raumentfaltung gehabt haben als in den schmalen Seitenemporen, innerhalb deren sich eine so zahlreiche Gesellschaft nicht um den Tisch des die Urkunde aufnehmenden Notars versammeln konnte. Die Betheiligten hatten sich, wie wir gesehen haben, zunächst vor der Kirche in gradibus versammelt und begaben sich dann zur Aufnahme der Urkunde oben in die Kirche. Wir dürfen daher an der genannten Stelle eine geräumige Empore, gleich der in der Kirche zu Hecklingen voraussetzen.

Es ermangelt noch einer Erklärung für den zwischen beiden Emporen an der Ostseite des Schiffes gespannten Bogen (Abb. 5 bei i u. Abb. 11). Da er nicht im Verbande mit dem Mauerwerk der Vierung, wohl aber mit dem der Schiffe und Emporen der Kirche gemauert ist, so muſs er vor der Vierung und gleichzeitig mit der übrigen Kirche erbaut sein. (Wegen seines Verhältnisses zur Vierung sieh weiter unten.) Einen Lettner (einen jubé) kann dieser Bogen nicht vorstellen, weil ein solcher in Deutschland überhaupt erst gegen Ende des 12. Jahrhunderts, also mindestens 200 Jahre nach Erbauung unserer Kirche aufkam.[63]) Weil ferner der Lettner eine Scheidewand zwischen Chor und Kirche vorstellen soll, wenn er auch, namentlich bei älteren Bauwerken, mit Thüren durchbrochen ist,[64]) auch weil endlich ein solcher nie höher als bis an die Capitelle der Säulen oder Pfeiler und den Gewölbeansatz des Bogens über ihm ausgeführt ist[65]), während unser Bogen sich gerade wie eine zum Eintritt einladende Pforte öffnet und erst über den Capitellen der Pfeiler überhaupt beginnt. Daſs der Bogen von Anfang an zur Aufstellung von Altären oder doch eines Altars errichtet worden sei, wäre an sich nicht ausgeschlossen, da Beispiele solcher Art vorkommen, allein es ist im vorliegenden Falle doch wohl nicht anzunehmen. Vor allem wäre der Bogen in seiner ursprünglichen ganzen Breite, und auf diese würde es doch allein hier ankommen, zu schmal, um dem an einem Altar amtirenden Geistlichen genügenden Raum zur freien Bewegung gewährt haben zu können. Sodann müſste es doch einen besonderen Zweck gehabt haben, den Altar gerade hier aufzustellen, wie das z. B. vorkommt, wo im Interesse der Theilnahme der vom Kirchenbesuch ausgeschlossenen Büſser an dem Meſsopfer ein Altar über einem als Eingang von der Vorkirche zum Kirchenschiff dienenden Bogen aufgestellt wurde. Endlich aber, und das scheint wohl der wichtigste Grund zu sein, sind aus den ältesten Zeiten der Kirche keine Altäre auf dem Bogen bezeugt. Wir finden zwar 1782 zwei Altäre als daselbst aufgestellt erwähnt,[66]) dagegen waren die in den ältesten Urkunden genannten Altäre alle unten in der Kirche. Da nun das Archiv des Kreuzstiftes sehr gut instand gehalten worden ist, so wäre es doch auffallend, daſs ein noch dazu an einer so merkwürdigen Stelle errichteter Altar nicht erwähnt worden wäre. Es wird also anzunehmen sein, daſs die auf dem Bogen in späterer Zeit erwähnten Altäre deshalb hier aufgestellt worden seien, weil in der Kirche kein weiterer Raum mehr für sie war — wobei aber immer der Mangel einer Stiftungsurkunde auffallen müſste —, oder, was man mit Rücksicht auf diesen Mangel eher annehmen möchte und was auch der mündlichen Ueberlieferung entspricht (vgl. oben unter C, S. 237), sie wurden hier während der Stürme der Reformationszeit aufgestellt, als die Kirche selbst dem Stifte entzogen war, dies aber, am alten Glauben festhängend, doch irgend einen Platz haben muſste, an welchem es seinen Altardienst verrichten konnte, wozu keine andere und keine sicherere Stelle gefunden werden konnte als auf dem Bogen. War doch dieser nur von der gesicherten Galerie aus, über diese aber unmittelbar vom Stift aus zu erreichen. Vielleicht wurde damals auch die zwischen der Südempore und dem Bogen befindliche Thür verengert, um den Durchgang durch sie besser gegen Uebergriffe zu sichern. Der Bogen muſs also einen anderen Zweck gehabt haben und zwar einen doppelten, einmal den, die beiden Längsemporen zu verbinden, und sodann den der Unterstützung zur Vertheidigung der Kirche.

62) Doebner II S. 210.

63) Müller und Mothes II S. 621.

64) Viollet-le-Duc S. 147, Müller und Mothes II S. 621.

65) Seefselberg S. 97.

66) Lüntzel, Geschichte II S. 601.

Betrachten wir unsere Kirche als ein vorgeschobenes Werk der Bischofsburg und zur Aufnahme der Bewohner der nächstgelegenen Dörfer bestimmt, so kommen wir zu folgenden Schlüssen. Die Westfront der Kirche mit einer Anzahl schmaler Fenster, deren Erinnerung noch in den drei dicht neben einander stehenden Spitzbogenfenstern (Abb. 10) festgehalten wird, vertheidigte den Zugang zu den Treppenstufen, der noch dazu durch die nicht allzufern dahinter liegende Bischofsburg Deckung erhielt. War es dem Feinde gelungen, durch das Portal der Kirche, das wir uns wie bei der ältesten Andreaskirche in Hildesheim[67]) durch Säulen in drei Eingänge getheilt denken dürfen, in das Innere einzudringen, so hatte er zunächst nichts weiter erreicht, als in das der Kirche quer vorgelegte Tonnengewölbe gelangt zu sein, von wo das senkrecht dazu angelegte Gewölbe unter der Westempore in die eigentliche Kirche führt, und mufste nun erst den Ausgang dieses Gewölbes erzwingen, der wegen seiner gröfseren Oeffnung einer gröfseren Zahl von Vertheidigern Aufstellung gewährte, als durch die wesentlich schmalere Portalöffnung Angreifer eindringen konnten. Gleichzeitig diente das Quergewölbe, die Vorkirche, als Zwinger, in dem sich die Vertheidiger zu einem Ausfalle sammelten, um dann, plötzlich hervorbrechend, sich auf den aufsen andringenden Feind zu stürzen und diesen den aus der Domburg ausfallenden Streitern entgegen zu treiben. Gelang es dem Feinde aber auch, durch das erwähnte Gewölbe in die innere Kirche einzudringen, so wurde er hier mit Pfeilschüssen und Steinwürfen von den Emporen, die mit den verhältnifsmäfsig kleinen Bogenöffnungen wie mit Schiefsscharten versehen waren, und von dem östlichen Bogen aus begrüfst, der deshalb, weil er dem Eingange gerade gegenüber lag, eine besonders wichtige Stellung für die Vertheidiger bot, und den wir uns daher mit einer hölzernen Brustwehr nach der Kirche zu abgeschlossen denken müssen, da von einer steinernen Einfriedigung keine Spur erhalten ist. Die grofse Empore über der Eingangsthür aber bildete, weil sie nur durch die engen Wendeltreppen zu erreichen war und vollkommen aufserhalb der feindlichen Schufslinie lag, einen vortrefflichen, sicheren Aufenthaltsort für die hierher geflüchteten Weiber und Kinder, es konnten auch von ihm Steine u. dgl. auf die unter ihr eindringenden Feinde geschleudert werden, ohne dafs der Werfende irgend einem Gegenwurf ausgesetzt gewesen wäre. An der Ostseite der Kirche dürfte ein im Halbkreis vorgebauter Thurm oder thurmartiger Chor angebracht gewesen sein, der den östlichen Eingang zum Kirchhofe deckte und als Ort zum Ausspähen diente und der seine Erinnerung noch in dem späteren Vierungsthurm und in dem jetzigen Thurm der Kirche bewahrt hat, die beide verhältnifsmäfsig recht hoch sind (vgl. Abb. 1 und 8).

In diesem Chorthurme war, um den Schutzheiligen der Kirche mit in die Vertheidigung hineinzuziehen (vgl. oben S. 239) und um den in die Kirche Geflüchteten Gelegenheit zur Anrufung Gottes und der Heiligen zu bieten, in dem unteren Geschosse dieses Ausbaues eine Chornische mit Altar eingerichtet, zu der unser Bogen möglichenfalls den Triumphbogen bildete. Es konnte in den oberen Geschossen dieses Ausbaues auch noch ein letzter Zufluchtsort wie im Bergfried der Burgen angebracht sein, zu dem dann der Zugang nur über den Bogen führt, auf dem sich nicht ein Feind halten konnte.

Ich will hier daran erinnern, dafs die zwischen 960 und 965 erbaute Stiftskirche in Gernrode[68]) auf beiden Seiten des Mittelschiffes durch Triforien von diesem abgetrennte und durch eine westliche Empore verbundene Emporen besafs, die auch nur durch zwei enge (sturmfreie) Wendeltreppen zu erreichen waren und den Nonnen als gesicherter Aufenthaltsort dienten, die aber, als man bei der Einkehr friedlicherer Zeiten, in der ersten Hälfte des 12. Jahrhunderts, den Nonnen andere bequemere Plätze anweisen konnte, überflüssig erschienen und vollständig vermauert wurden, bis sie in unserer Zeit wegen ihrer decorativen Wirkung wieder geöffnet wurden. Auch in Hecklingen befand sich der Aufenthaltsort der Nonnen auf einer zwischen den Pfeilern und Säulen der Südseite der Kirche angelegten Empore, die allerdings in ihrem jetzigen Zustand erst aus der Mitte des 13. Jahrhunderts stammt.[69])

Vorhanden waren die Emporen bereits vor Hezilos Anbau; dies erhellt aus ihrer bereits hervorgehobenen baulichen Verbindung mit der Kirche und aus der zu der alten, 1184 verlegten Propstei (sieh A, E) führenden Thür am westlichen Ende der Südempore (Abb. 5 bei c). Dafs die Emporen 1372 noch vollständig vorhanden waren, erhellt daraus, dafs man sonst nicht damals von einem oberen ambitus als Versammlungsraum hätte reden können. Sie müssen aber auch noch 1558 in Benutzung gewesen sein; denn damals zog Frau v. Kirchberg, die berüchtigte Eva v. Trott in die ihrem Sohne Heinrich Theuerdank v. Kirchberg, dem damaligen Propste beim heiligen Kreuze, zustehende Propstei und zwar in den nach dem Hofe zu gelegenen, an den Kreuzgang anstofsenden Flügel, und es wurde ihr in dem genannten Jahre vom Stiftscapitel verwilligt, „tzu der thür, so aus der probstey in die kirche gehet, ein blindt schloss, das man ohne schlüssel nit offenen kann, machen zu lassen“ und durch diese Thür in die Kirche ein- und auszugehen.[70]) Sie kann sich danach nur durch die in Abb. 5 bei b befindliche Thür begeben und auf der Empore aufgehalten haben, weil die ganze Genehmigung sonst keinen Sinn gehabt hätte. Wenn wir nun weiter hören, dafs man vor dem Neubau des nördlichen Seitenschiffes 1704 darüber verhandelte, ob man die zwei kleinen naves bestehen lassen wolle, und dann neben deren Umwandlung in ein Schiff die obere Wand bis zum Dach erhalten, deren unteren Theil aber stückweise erneuern und neue Bögen setzen wollte, wobei sich die Bogenwölbung des alten Triforiums vollständig erhalten hat, aber vermauert worden ist, so müssen wir annehmen, dafs die Emporen bis dahin vollständig erhalten waren, dann aber die nördliche vollständig beseitigt, die südliche aber zur Herstellung möglichster Gleichmäfsigkeit zwischen den beiden Wänden des Hauptschiffes der Kirche vermauert worden ist. Wann das Capellendach an der Aufsenseite der Südwand der Empore emporgeführt und damit die Veranlassung zur Vermauerung der Aufsenfenster der Empore geworden ist, können

67) Vgl. darüber den Aufsatz des Verfassers dieser Zeilen in der Zeitschrift für bildende Kunst N. F. Band III, Leipzig 1892, S. 298 ff.

68) v. Heinemann, Geschichte von Gernrode S. 34, 35.
69) Büttner S. 155.
70) Copialbuch Bl. 167, 168.

wir nicht sagen, vermuthlich aber geschah es im 15. Jahrhundert beim Umbau der Capellen, hatte auch keine so grofse Bedeutung, weil bei der reichlichen Lichtzufuhr durch die zahlreichen Fenster der Kirche die Empore immer noch genügende Beleuchtung besafs. Noch weniger können wir über die Zeit sagen, zu der die flache Decke über der Südempore beseitigt worden ist.

Ich will noch darauf aufmerksam machen, dafs der wichtigste Altar der Kirche, der dem heiligen Kreuz geweihte, von dem Stift und Kirche den Namen führt, nicht der Hochaltar war, sondern sich vor dem Chor befand.[71]) Dies würde nach der vorstehenden Darstellung der ursprüngliche Altar der Kirche gewesen sein, den man bei der Erweiterung der Kirche an seiner ursprünglichen Stelle beliefs, sodafs er auch im baulichen Sinne zum Kreuzaltar wurde, einer Stelle, an der er noch 1479 erwähnt wird.[72]) Obwohl die Kirche zur Zeit Hezilos bereits eine „Partikel“ vom heiligen Kreuze besafs, so wurde der Hochaltar doch der heiligen Speciosa, einer Schwester des heiligen Epiphanius,[73]) des Hauptheiligen des Domes, geweiht.

Auch mag daran erinnert werden, dafs man durch Wölbung der Seitenschiffe und der Vorhalle die Oberkirche feuersicher gemacht hatte, und wenn es auch bekannt ist, dafs man die Seitenschiffe wegen ihrer geringen Spannweite leichter überwölben konnte als das Mittelschiff, so haben wir es hier doch mit etwas für Hildesheim ganz Besonderem zu thun, da diese Stadt keine einzige andere romanische Kirche mit gewölbten Seitenschiffen besitzt, vielmehr sogar ein Theil der gothischen Kirchen Seitenschiffe mit flachen Holzdecken hat. Das einzige, was man als etwas verwandt hierfür bezeichnen könnte, ist der gewölbte Chorumgang in der Godehardkirche, der aber erst etwa aus der Mitte des 12. Jahrhunderts stammt und nach einem französischen Plane gebaut ist.

Ob hinter dem besprochenen Bogen sich nur, wie angedeutet, eine Chornische oder ein weiterer Rückzugsraum oder eine glatte Wandfläche befand, mufs man nach dem bisher Erforschten unentschieden lassen. Jedenfalls war der höher gelegene Vierungsbogen dahinter nicht vorhanden, denn er steht abweichend von dem vor der Westempore angebrachten Bogen nicht bündig mit unserm Bogengang nach der Kirche zu, sondern hinter ihm nach aufsen zu, wenn auch in der Flucht der alten Kirchenwand (Abb. 5 bei k h, Abb. 9), ist auch nicht im Verband mit dem Bogen zwischen den beiden Emporen gebaut. Allerdings sind sämtliche Vierungsbögen nicht in gleichen Mauerschichten aufgeführt, wofür ein Grund nicht angegeben werden kann; dies ist aber für die vorliegend zu entscheidende Frage unerheblich, weil es sich nur um das Verhältnifs zwischen den Vierungsbögen und dem Verbindungsbogen handelt.

Wir müssen nach all dem Gesagten annehmen, dafs Hezilo bei der Erweiterung der Kirche den Verbindungsbogen bestehen liefs, vielleicht aus baulichen Gründen, um durch seine Wegnahme das Gebäude nicht zu gefährden, vielleicht nur als bequemen Verbindungsgang zwischen den beiden Längsemporen, vielleicht auch aus dem einfachsten Grunde, weil für seine Beseitigung eine Veranlassung nicht vorlag. Dagegen beseitigte Hezilo die Wand hinter dem Bogen oder das, was sonst dort angebracht war, und führte nun zwischen den stehen gebliebenen Theilen der alten domus belli, den Ostwänden der Längsemporen, den neuen Triumphbogen auf, der mit Rücksicht auf die Höhe des Kirchenschiffes genau dieselbe Höhe wie der Bogen vor der Westempore erhalten mufste.

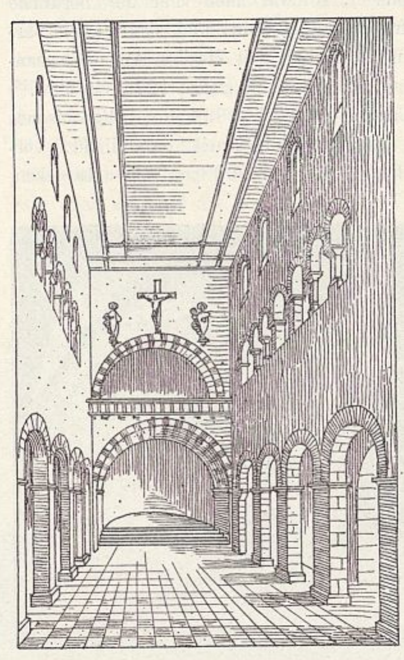


Abb. 11.

Ob diese Ausführungen vollständig zutreffend sein werden, mögen gröfsere Kenner nach genaueren Forschungen und namentlich nach Blofslegung der jetzt verdeckten Gebäudetheile entscheiden; mir soll es genügen, eine vielleicht nicht ganz unbegründete Anregung zu weiteren Nachforschungen gegeben zu haben. Ich füge in Abb. 11 eine Skizze bei, wie die Kirche nach dem Hezilo-

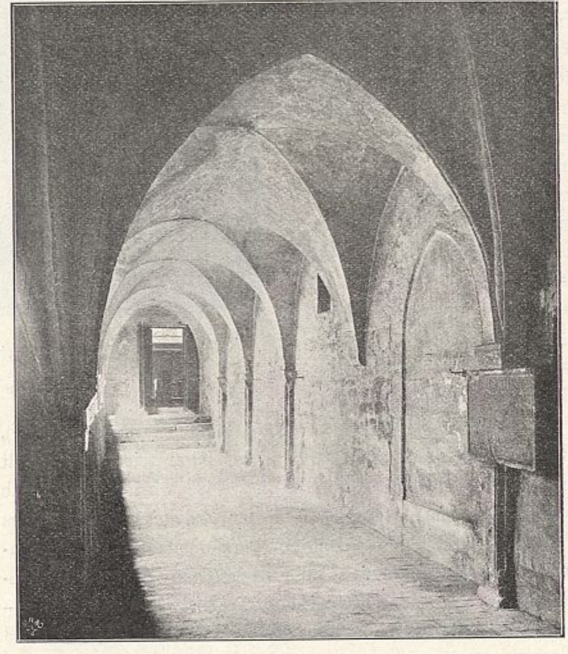


Abb. 12. Ostflügel des Kreuzganges.

schen Neubau sich dargestellt haben mag. Denkt man sich den Raum zwischen den beiden Bögen, dem Verbindungs-

71) Krätz S. 5.
72) Copialbuch Bl. 32, 33.
73) Stadler Bd. V S. 348.

und dem Triumphbogen, geschlossen, so hat man die Kirche, wie sie meiner Ansicht nach vor Hezilos Umbau beschaffen gewesen sein mag.

Wie in Gernrode[74]), so war auch hier der nördliche Kreuzarm der Jungfrau Maria geweiht, und zwar deren Verkündigung. Diese unzweifelhaft seit Hezilos Anbau vorhandene Mariencapelle wird urkundlich zuerst 1275 erwähnt.[75]) In der Apsis der Capelle hat sich 1863 ein spätgothisches Freskogemälde, die Verkündigung Mariä darstellend, vorgefunden, das durch den Anfang 1899 beseitigten barocken,

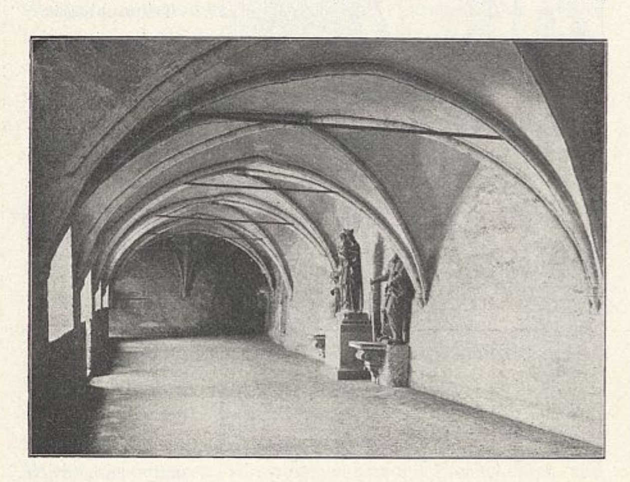


Abb. 13. Südflügel.

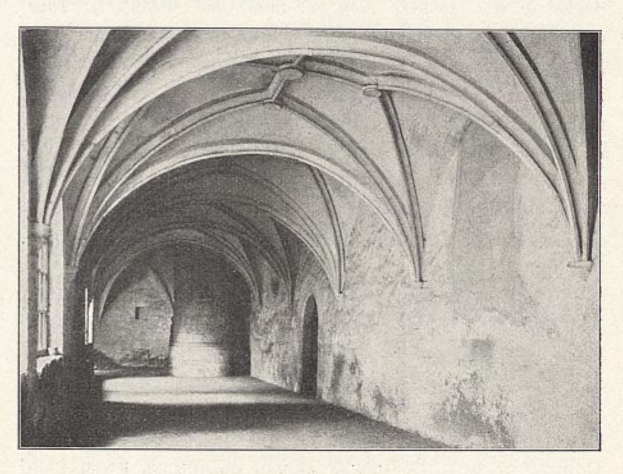


Abb. 14. Westflügel.

von 1705 herrührenden[76]) Altar verdeckt gewesen war; es stellt den Engel und die Jungfrau, durch das jetzt vermauerte Fenster getrennt, dar. Diese Malerei ist jetzt, da sie infolge ihrer mangelhaften Erhaltung nicht mehr genügte, um zur Erbauung zu wirken, und da man sie doch nicht „restaurieren" mochte, durch einen Teppich verhängt und wird somit erhalten. Wir sind in der angenehmen Lage, mit ziemlicher Gewifsheit das Jahr anzugeben, in dem das Gemälde entstanden ist. Laut Testaments vom Jahre 1500 stiftete der Domherr Friedrich v. Alten eine neue Vicarie ad altare beatae Mariae virginis[77]), und in Anknüpfung daran dürfte der Altar wiederhergestellt und die Wand bemalt worden sein. Dies wird auch deshalb anzunehmen sein, weil sich bei der Erneuerung des Altars 1899 in dessen Sepulchrum ein Pergamentzettel vorfand, inhaltlich dessen Ludwig, Titularbischof von Misina (in Macedonien) — es ist der Franziskaner P. Ludwig von Segen — als Weihbischof in Hildesheim diesen Altar am 27. Mai 1503

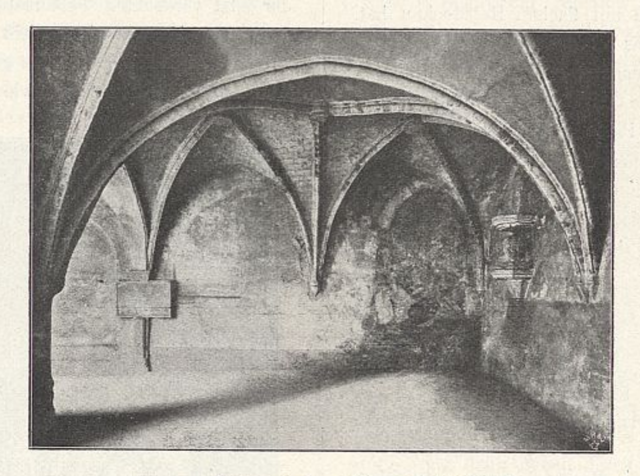


Abb. 15. Ecke zwischen Ost- und Südflügel.

Abb. 13 bis 15. Kreuzgang.

74) v. Heinemann, Zeitschrift S. 31.
75) Doebner I S. 173.
76) Fabrik-Register 1705/06.
77) Copialbuch Bl. 67.

geweiht hat.[78]) Sehr wahrscheinlich wird das Bild gelegentlich dieser Erneuerung des Altars gemalt sein, wie es denn auch dem spätgothischen Stil jener Zeit vollständig entspricht.

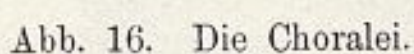
Ob der unter F zu besprechende Altaraufsatz auf diesem Altar gestanden hat, kann nicht festgestellt werden, den Mafsen nach wäre es nicht ausgeschlossen.

E. Kreuzgang und Nebengebäude.

Auf der Südseite der Kirche befindet sich ein dreiarmiger Kreuzgang (Abb. 12 bis 15), der auch ursprünglich nur dreiarmig gewesen zu sein scheint, da keine Spur eines vierten (nördlichen) Armes erhalten ist, die Stelle, wo er gestanden haben könnte, vielmehr durch die südlichen Capellen eingenommen wird, die, wie wir sahen, nach einander erbaut sind und in der jetzigen Aufsenwand der Kirche noch die Spuren hiervon hinterlassen haben. Auch darf man aus dem Grundrifs der Kirche darauf schliefsen, dafs ein Arm des Kreuzganges nicht an ihrer Südseite vorbei gegangen ist, weil die Ausgangsthür des Ostarmes in das Querschiff, die des um ein Gewölbejoch längeren Westarmes jenseits der Capellen in die alte Kirche mündet (Abb. 5), sodafs ein längs der Kirche hinführender Arm des Kreuzganges nicht denkbar ist, weil ihm wegen des vorspringenden südlichen Querschiffes die Verbindung mit dem Ostarm gefehlt haben würde.

78) Die mir von Herrn Pastor Graen zur Verfügung gestellte Urkunde lautet: „M^{o} V^{c} tertio die vicesima septima Mai Nos Fridericus Episcopus Ecclesiae Misinensis consecravimus altare in honorem s. Mariae Virginis et reliquias multorum sanctorum in eo inclusimus, singulis christifidelibus hodiernum annum et in die anniversario consecrationis ecclesiam visitantibus 40 dies . . . . . indulgentia in forma ecclesie consueta . . . . ." (Die durch Punkte angedeuteten Stellen sind vor Alter unleserlich geworden). Welche Reliquien eingeschlossen waren, kann nicht mehr festgestellt werden.

Der Kreuzgang ist romanischen Ursprunges, gleichzeitig mit der Erweiterung der Kirche und Gründung des Stiftes durch Hezilo erbaut worden, wie dies auch Mithoff[79]) und Krätz[80]) annehmen, und ähnelt in seinen ältesten Theilen entschieden dem ja auch vom Bischof Hezilo herrührenden Kreuzgange auf dem Moritzberge. Er ist jetzt mit Gewölben versehen, und es sind zur Aufnahme des Gewölbeschubs im Inneren des Ganges Pfeiler und aufsen (im Kreuzhof) Strebepfeiler angebracht. Im Ostflügel zeigen sich zwei vermauerte spitzbogige Thüren (Abb. 12, S. 246), die zu der nach alter Sitte[81]) dort angebracht gewesenen Capitelstube und sonstigen Räumen geführt haben. Die alte Capitelstube ist nicht mehr vorhanden. Neben der Kirche liegt die Sacristei, die Ende des 15. Jahrhunderts mit ihrem jetzigen Rippengewölbe versehen worden ist.[82]) Der von dem Kreuzgange umschlossene Hof wird in den Capitelprotokollen und Fabrikregistern Grashof (1693), Grasgarten (1745/46), Friedhof (1737/38),[83]) Freythof (1737/38, 1740/41 u. a.), der Vicarien Friedhof (1745/46) genannt, diente also zu deren Bestattung. Auch befand sich hier ein Brunnen und ein Abort, welche beide in den Fabrikregistern oft erwähnt werden. Im Kreuzgang selbst wurden die Stiftsherren begraben, wie uns die vielen daselbst angebrachten Grabsteine und die Angaben der Fabrikregister über Wiederherstellung eingefallener Gräber lehren. Wie es zur Zeit seiner Erbauung üblich war,[84]) wird der Kreuzgang auch zunächst eine flache Holzbalkendecke getragen haben, und ist also erst später mit seinen jetzt vorhandenen Gewölben versehen worden. Man scheint die Ueberwölbung nach der Zeit der Schadhaftwerdung der Decken vorgenommen zu haben, da der östliche Arm, der am meisten dem Wetter ausgesetzt war, zuerst überwölbt wurde; denn er besitzt ein einfaches, in Sandstein ausgeführtes Gewölbe ohne Rippen, und die Gewölbe stützen sich an der Wandseite auf Pfeiler mit abgefasten Kanten, wie dies etwa im 13. Jahrhundert üblich war (Abb. 12). Der südliche Arm (Abb. 13) ist in Backsteinen mit einem Rippengewölbe überdeckt und zeigt in den Schlufssteinen die Wappen zweier Stiftsherren, deren einer für die erste Hälfte des 15. Jahrhunderts bezeugt ist.[85]) Die Gewölberippen sind in Backstein-Formsteinen hergestellt — das einzige Beispiel dieser Art in Hildesheim. Der Westflügel (Abb. 14) endlich ist in noch späterer Zeit mit in Backsteinen ausgeführten Sterngewölben versehen, die überhaupt erst im 15. Jahrhundert aufgekommen sind. Ueber dem Kreuzgange lag die Bücherei, zu der ein Aufgang aus dem Kreuzgarten führte,[86]) auch lagen daselbst wie noch jetzt Wohnungen, in deren einer z. B. Eva v. Kirchberg wohnte (sieh oben), wie auch daselbst die Wohnungen der Vicarien genannt werden. Ein oberer Kreuzgang wird nirgends erwähnt, sondern es wird nur stets einfach vom Kreuzgange (ambitus) geredet,[87]) auch ist nirgends die geringste Spur eines solchen zu entdecken, die sich doch namentlich an der Kirche in Gestalt vermauerter Zugänge erhalten haben würde. Wir müssen danach auf die Annahme, dafs ein solcher Fall vorhanden sein könne, vollständig verzichten (s. oben S. 244). In der Ecke zwischen Ost- und Südflügel ist die Todtenleuchte[88]) angebracht (Abb. 15), an dem Westflügel ist eine dem heiligen Vincenz geweiht gewesene Capelle (vgl. Abb. 5) erbaut, die wir der alten Regel entsprechend als Tonsurcapelle ansehen dürfen.[89]) Wenn Krätz[90]) annimmt, in dieser Capelle seien die Pfarracte für die zur Kreuzkirche gehörigen Gemeindeglieder vorgenommen worden, so dürfte er irren; denn wenn auch ein Geistlicher für eine solche Gemeinde, ein plebanus, bereits sehr frühe erwähnt wird, so wurde doch sicher die Gemeinde nicht in die Clausur gelassen, zu der diese Capelle gehörte. Wie streng die Clausur, in welche das Geräusch der Welt nicht eindringen sollte, gehandhabt wurde, ersehen wir daraus, dafs noch 1325 und 1372 Stiftsgeistliche wegen Pflichtvergessenheit in das claustrum eingesperrt werden.[91]) Die Gemeinde dürfte die Kirche selbst benutzt haben, wie wir das oben[92]) bezüglich der Beerdi-

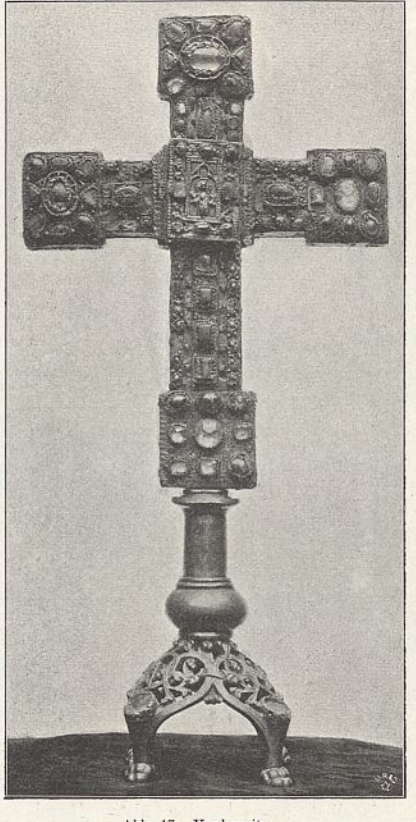

Abb. 16. Die Choralei.

79) S. 141. 80) S. 7.
81) Müller und Mothes I S. 249.
82) Krätz S. 5.
83) 1337 vrydhove. Doebner II S. 81.
84) Müller und Mothes II S. 595.

85) Eckehard v. Wenden. Doebner IV S. 219, 409, 551.
86) Fabrikrechnung 1744/45, Protokoll Nr. 91, 1764 Mai 5.
87) Vgl. Doebner II S. 90.
88) Müller und Mothes II S. 927.
89) Müller und Mothes II S. 930.
90) S. 7.
91) Lüntzel, Geschichte II S. 597. Doebner II S. 215.
92) S. 233.

gungen der Hausgenossen der Stiftsgeistlichen sahen, und wie noch 1696 die „Türkenmesse“ für die Gemeinde in der Kreuzkirche selbst gelesen wurde. Man begab sich allerdings damals, vermuthlich weil nur wenige Personen daran theilnahmen, durch den Kreuzgang und die unmittelbar neben dessen Eingange befindliche Thür der Kirche in diese; denn dort lauerte beim Ausgange aus dieser Messe der Postmeister dem Dr. Franz Beckmann auf, um ihn mit seinem Stocke zu schlagen,[93]) gleichzeitig aber (1693) wird Beschwerde geführt, dafs der Grashof und der Kreuzgang fortwährend offen ständen, und besserer Verschlufs angeordnet,[94]) sodafs wir das Geschlossenhalten als die Regel ansehen müssen. Die erwähnte Capelle ist in ihrer jetzigen Gestalt 1357 oder kurz vorher erbaut.[95]) Sie ist im edelsten gothischen Stile errichtet, zeigt aber die Merkwürdigkeit, dafs die Achse des Gewölbes etwas nach Norden verschoben ist, ohne dafs man dafür einen Grund finden kann. Der Schlufsstein zeigt das Gesicht des leidenden Erlösers. Der Westflügel öffnet sich nach dem Platze vor der Kirche durch eine mit flachem Sturz versehene Thür.

An den westlichen Flügel des Kreuzganges stiefs selbstverständlich von Anfang an die Propstei. Das Stift bedurfte aber früh einer Ausdehnung seiner Räumlichkeiten, vermuthlich zur Unterbringung der mit ihm verbundenen Schule. Deshalb ertheilte Bischof Adelog durch Urkunde vom 23. August 1184 die Erlaubnifs, die Propstei zur Erweiterung des Stiftes abzubrechen.[96]) Die alte Propstei mufste einen Zugang zur Kirche gehabt haben, der nun überflüssig wurde, wir haben ihn in der vermauerten Rundbogenthür auf der Westseite der noch vorhandenen Empore in der Kirche gesehen (Abb. 5 bei c). Da er bei dem jetzigen Verhältnifs der Bauwerke zu einander ins Freie führen mufste, so mufs die alte Propstei weiter nach Norden gereicht haben oder durch einen Gang oder ähnlich mit der Kirche verbunden gewesen sein. Die neue Propstei, südlich von dem alten Gebäude aufgeführt, ist später mehrfach umgebaut und kann hier, als zu den eigentlichen Stiftsgebäuden nicht gehörig, übergangen werden; nur sei hier bemerkt, dafs sie einen Zugang zum westlichen Kreuzgangflügel erhielt, der in einer thurmartigen, mit schiefsschartenartigen kleinen Fenstern versehenen Treppe besteht (Abb. 14). An der Stelle der alten Propstei bauten nun die Stiftsherren die „Choralei“, d. h. das Haus, wo die Schüler der mit dem Stift verbundenen Schule[97]) und sonstige Glieder des Kirchenchores, die Choralen, untergebracht wurden und das davon jetzt noch seinen Namen trägt (Abb. 16, S. 249). Aus 1184 dürfte das Erdgeschofs der Choralei mit seinem kleinen durch halbkreisförmige Bögen geschlossenen Fenster gehören, das noch jetzt ein ganz anderes Mauerwerk zeigt, als das übrige Haus, und an der Nordseite sogar etwas über das Mauerwerk der oberen Geschosse vorspringt. Der obere Theil des Hauses mit seinem durchaus nicht mehr romanischen Giebel möchte dagegen kurz vor 1397 entstanden sein, da die Stiftsherren in einer Urkunde vom 20. Februar d. J. von einer restauratio magni aedificii, quod apud . . . . ecclesiam ereximus, reden. Ein magnum aedificium haben wir hier vor uns, ein anderes solches neben der Kirche ist nicht vorhanden. Man hat damals wohl die spitzen Thüren in der Front (Abb. 16) und im Kreuzgang



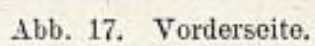


Abb. 17. Vorderseite.

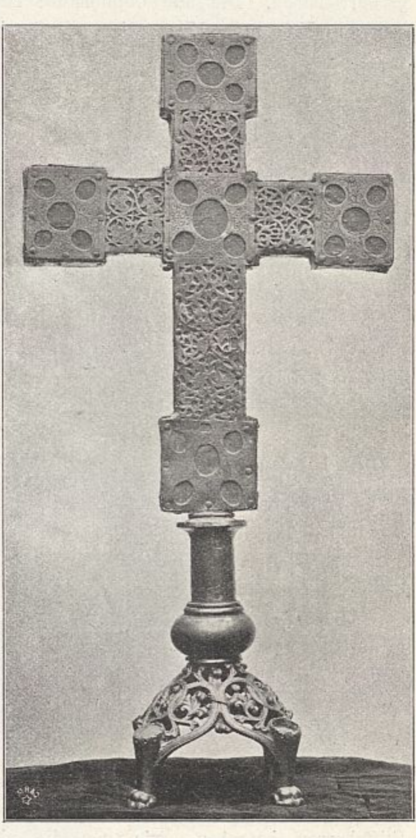


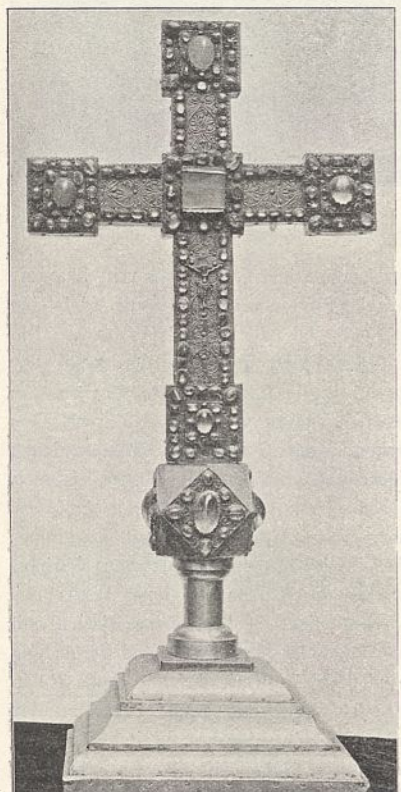
Abb. 18. Rückseite.

Abb. 17 u. 18. Hezilo-Kreuz.

93) Protokoll Nr. 10.
94) Protokoll Nr. 10. 1693 Mai 5.
95) Doebner II S. 81, S. 90.
96) Das Original dieser Urkunde befindet sich im diplomatischen Apparat der Universität Göttingen; vgl. auch Drebner I S. 15. Die einschlagenden Worte lauten: „licentiam etiam extendendi fines et terminos claustri sui quesitam . . . pro ipsorum necessitate dedimus et domum prepositi quam pro eadem necessitate frangi necesse erat, ad edificium tamen claustri eis contulimus et ne futurus praepositus in edificiis illis aliquid iuris aliquo modo sibi vindicet, omnino prohibemus.“

97) Wir haben dieser Schule schon oben (S. 234) gedacht, es war eine Schule mit Internat und Externat, in der die Schüler (Scholares de dormitorio, Dormitoriales, Schlafschüler, Schlafgesellen, Chorales, adscripti choro, Chorschüler, Chorgesellen) zur Mitwirkung bei den kirchlichen Gesängen und aufserdem in den Elementarwissenschaften unterwiesen wurden; diese Schule bestand bis zur Aufhebung des Stiftes 1810. Vgl. Zeppenfeldt S. 58 ff., Relation des Fürstbischofs Franz Egon S. 368, 369.

(Abb. 15) eingesetzt, sich aber bemüht, die Westfront möglichst mit dem alten Bau in Einklang zu bringen und dabei entweder die früher vorhanden gewesenen Fensterumrahmungen wieder benutzt, oder doch versucht, die neuen Fenster den alten möglichst anzupassen. Die Fenster des dritten Geschosses mit ihrer Dreitheilung und ihrem wagerechten Sturz (Abb. 16) rühren allerdings aus spätgothischer oder gar der Renaissancezeit her, um sie ist das Mauerwerk herausgenommen und erneuert; es hatte vielleicht durch die unmittelbar darüber liegende Dachtraufe gelitten. Mit dem Kreuzgange ist die Choralei durch eine mit einem Spitzbogen überwölbte und mit flachem Sturz gedeckte Thür verbunden.



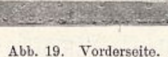


Abb. 19. Vorderseite.

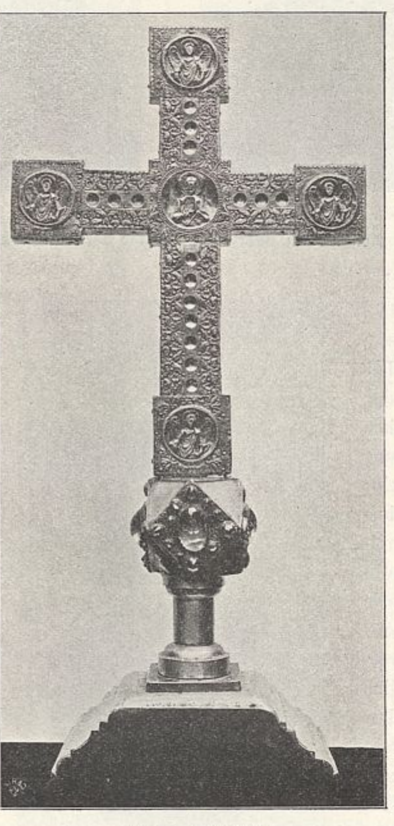


Abb. 20. Rückseite.

Abb. 19 u. 20. Kreuz Heinrichs des Löwen.

F. Einzelne Kunstwerke.

Abgesehen von den erwähnten Kunstwerken mögen noch folgende hervorgehoben werden.

In der Kirche befindet sich an der Westseite nördlich der Eingangsthür der Grabstein eines Priesters, der einen Kelch in der Hand trägt, mit der in gothischen Majuskeln ausgeführten Umschrift: Anno domini 1447 mensis novembris die 29 obiit dominus Johannes Christianus de Alvelde decanus ecclesie sancte crucis et canonicus Verdensis, cujus anima requiescat in pace. Darüber befindet sich ein Wappen.

Im südlichen Kreuzgangarm ist jetzt ein Standbild der Mutter Gottes aufgestellt (Abb. 13), deren Ursprung dunkel ist. Sie ist eine durchaus nicht üble Arbeit, aus Kalkstuck gefertigt, etwa aus der Blüthezeit der Gothik, spätestens aber aus dem 15. Jahrhundert, sie kann aus einer der mit dem Stift verbundenen Mariencapellen stammen, kann aber auch einfach wegen ihrer selbst oder als Heilige des Bisthums Hildesheim aufgestellt worden sein.

Wir erwähnten bereits oben (S. 248) den Altarschrein, der jetzt in der zweiten westlichen Capelle der Südseite der Kirche steht. Dieser zeigt in der Mitte die Mutter Gottes, links und rechts von ihr die Apostel Simon und Judas, ferner noch auf der inneren Seite der Flügel die Heiligen Lucia und Agnes, die Flügel sind aber so klein gehalten, daſs das Bild der Mutter Gottes auch bei geschlossenen Flügeln sichtbar bleibt. Der Schrein stammt aus spätgothischer Zeit, könnte etwa auch aus 1503 herrühren. Für welchen Altar er ursprünglich bestimmt war und ob er vielleicht als Ersatz für einen beseitigten beschafft worden ist, können wir nicht sagen. Vor seiner jetzigen Aufstellung war er in der Vincenzcapelle im Kreuzgang untergebracht; da er aber zu dieser keine besonderen Beziehungen verräth, diese Capelle auch als Aufbewahrungsort der auſser Gebrauch gekommenen Sachen diente, so könnte er auch dort nur abgestellt worden sein, was die oben S. 248 ausgesprochene Vermuthung bestätigen könnte. Von Interesse ist es, daſs die Apostel Simon und Judas darauf dargestellt sind; diese, als die Heiligen des Doms zu Goslar, legen nämlich Beziehungen des Altars, für den dieser Schrein bestimmt gewesen ist, zu Hezilo, dem Gründer des Kreuzstifts und Erweiterer der Kirche, nahe. Denn dieser war vor seiner Berufung auf den bischöflichen Stuhl Propst am Goslarer Dom.

Besondere Beachtung verdienen aber die im Kirchenschatz untergebrachten sehr werthvollen Reliquiare. Zunächst kommt in Betracht das mit Goldplatten belegte Hezilokreuz, das Bischof Hezilo der von ihm erweiterten Kirche geschenkt hat (Abb. 17 u. 18), dessen Anfertigung wir daher spätestens in das Jahr 1079 setzen müssen. Ueber vier Löwenfüſsen entwickelt sich ein aus romanischen Blattornamenten gebildeter Fuſs zum Knauf und Handgriff, aus dem ein lateinisches Kreuz hervorwächst, das auſser einem Quadrat auf der Kreuzung der Balken vier Eckquadratpotenzen zeigt. Es ist mit Edelsteinen (darunter eine Gemme mit einem Löwen neben dem Reliquienkasten, links vom Beschauer), mit Perlen und dem prachtvollsten Filigran, auf der vielfach durchbrochenen Rückseite, wo der rothe Sammet des Untergrundes hervorleuchtet, mit romanischen Ranken verziert oder doch verziert gewesen. Die Thür zu dem Reliquienbehälter mit dem segnenden Christus ist, wie aus den mit zwei Nasen versehenen Spitzbogen erhellt, in gothischer Zeit erneuert.

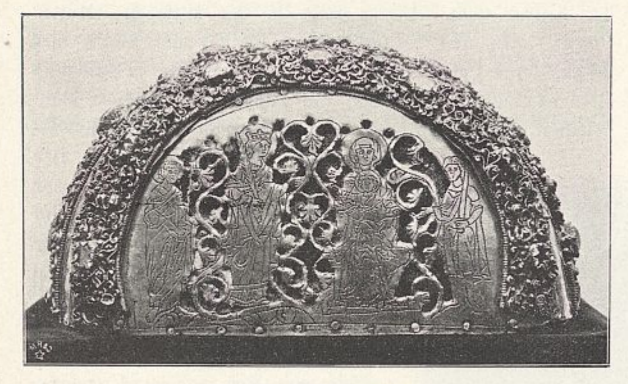


Abb. 21. Vorderseite.



Abb. 22. Rückseite.

Abb. 21 u. 22. Reliquiar der heiligen Katharina.

In diesem Behälter befinden sich Splitter vom Kreuze Christi. Das Kreuz besteht aus Eichenholz und hat eine Höhe von 0,40 m.

Ein zweites Kreuz (Abb. 19 u. 20), das gleichfalls einen und zwar einen grofsen Kreuzessplitter enthält, den Heinrich der Löwe von seiner Reise nach Palästina mitgebracht hat, schenkte dieser Fürst 1172 „ecclesiae sanctae crucis in civitate nostra Hildesenmense“ mit der Bestimmung, dafs die dieser Reliquie dargebrachten Opfer den Brüdern zum Nutzen der Kirche zustehen sollen.[98]) Wir sehen aus dieser Bezeichnung der Stadt Hildesheim, dafs Heinrich seine herzogliche Gewalt als eine wirkliche Landeshoheit auffafste, wonach es leicht zu begreifen ist, dafs bei seinem Sturze seine Nachbarn nach Kräften thätig waren, um die in seinen Händen lästig gewordene herzogliche Gewalt an sich zu bringen, dafs aber vorher das Kreuzstift es für sehr förderlich halten mochte, Heinrich in seine Brüderschaft aufzunehmen.[99]) Das Kreuz besteht gleichfalls aus mit Goldplatten überzogenem Eichenholz und hat eine Höhe von 0,49 m; sein ursprünglicher Fufs ist nicht mehr vorhanden. Es ist ebenfalls ein lateinisches Kreuz mit Eckquadraten und einem Quadrat auf der Balkenkreuzung. Es steht auf einem Würfel mit abgefasten Ecken, der mit Edelsteinen, Perlen, Gemmen, Filigran und getriebener Arbeit geschmückt ist. Die Vorderseite des Kreuzes ist mit gestanzten Verzierungen bedeckt, auf denen in späterer Zeit ein goldenes Crucifix aufgelegt ist. Das Quadrat der Kreuzung besteht aus einem Krystall, der die Reliquie bedeckt. Auf der Rückseite sind in getriebener Arbeit in der Mitte der segnende Heiland, auf den Eckquadraten Engel angebracht, während längs der Mittellinie des Kreuzes und der Arme halbkugelförmige Vertiefungen angebracht sind.

Abb. 23. Reliquiar, gestiftet von Siffrid Anthony.

98) Origines Guelficae, S. 520.
99) Lüntzel, Geschichte II, S. 180.

Das dritte Reliquiar (Abb. 21 u. 22) ist ähnlich dem Heiligthume des Domes[100]) in Form einer seitlich stark zusammengedrückten Halbkugel oder eines halben Brotes aus Eichenholz hergestellt und hat eine Höhe von 0,10 m und eine Breite von 0,18 m. Es ist mit Silberblech überzogen und mit einer kammartigen Verzierung von silbernem Schneckenfiligran versehen, in die Edelsteine eingesetzt sind oder zum Theil waren. Die im übrigen glatt gehaltene Vorderseite der Kapsel zeigt in Gold getrieben Christus am Kreuze, umgeben von Maria, die auf dem Drachen, dem Symbol des überwundenen Heidenthums, und von dem Jünger Johannes, der auf einem zusammengekauerten Juden, dem Symbol des überwundenen Judenthums, steht. Seitwärts ist rechts von Christus Johannes der Täufer mit dem Agnus dei, links ein nicht zu deutender Bischof mit einem Buch in der linken Hand dargestellt. Die von Rankenwerk durchbrochene Rückseite des Reliquiars zeigt zwischen den Ranken in eingerissenen Linien die thronende Mutter Gottes mit dem Christkind auf dem Schofse. Zu ihrer Rechten steht eine Heilige mit Palme und Krone, weiter rechts Petrus im langen Apostelgewand mit dem hoch erhobenen Schlüssel, links von Maria ein jugendlicher Mann ohne Heiligenschein im kurzen Rocke, mit einem aufgerichteten Schwert in der linken Hand. Auf dem Boden, des Gefäfses ist in stark verwischten Buchstaben die Inschrift eingeritzt: „Corpora sanctorum in pace sepulti sunt“. Diese Schrift ist in einfachen lateinischen Majuskelbuchstaben, wie sie bis Ende des 13. Jahrhunderts üblich waren, ausgeführt, und das Ende des 12. oder den Anfang des 13. Jahrhunderts nimmt man auch als die Entstehungszeit des Reliquiums an,[101]) wenn es ja auch nicht ausgeschlossen sein sollte, dafs ältere Formen auch noch in späterer Zeit Anwendung ge-

100) Bertram, Geschichte I, S. 30, 31.
101) Krätz, S. 11.

funden haben sollten. In dem Reliquiar befinden sich zwei genau hineinpassende Glasflaschen, aus deren Gröſse man schlieſsen könnte, es sei das Gefäſs eigens für sie angefertigt worden, wie allerdings ebensogut der andere Schluſs gerechtfertigt ist, sie seien hineingestellt, weil sie hineinpaſsten. Beide Fläschchen enthalten eine dunkelgelbe ölige Flüssigkeit, und es ist an jeder ein schmaler beschriebener Pergamentstreifen mit einer in gothischer Minuskelschrift (13. bis 15. Jahrhundert) gehaltenen Inschrift angeheftet. Die eine, nur noch zum Theil leserliche, lautet: „Oleum sce K....e“, das wohl heiſsen kann: Oleum sancte Katarine und zu den Angaben von Krâtz[102]) stimmt, daſs in dem Reliquiar Oel der heiligen Katharina enthalten sei. Auf dem anderen Zettel steht: „Oleum sce marie de sardynay“, eine Inschrift, für die eine Deutung zu finden mir völlig unmöglich geblieben ist. Ob man danach die auf der Auſsenseite des Reliquiars dargestellte Heilige für Katharina halten soll, wie Krâtz[103]) will, und überhaupt eine weitere Erörterung der ganzen Darstellung möge hier, als zu weit führend, ununtersucht bleiben.

Endlich sei noch eines vierten Reliquiars gedacht (Abb. 23), einer in Silber gefaſsten Kokosnuſs oder, wie Krâtz sagt, Meernuſs. Sie steht auf einem aus Silber gefertigten spätgothischen Fuſse, an dem das Wappen des Stifters, des Kanonicus Siffrid Anthony, angebracht ist, der das Reliquiar der Kirche im Jahre 1500 geschenkt hat.[104]) Auf der einen Felsblock darstellenden Spitze ist ein Heiliger, mit einem Buch in der Linken, in Silber gegossen, dargestellt, in dem wir vielleicht im Hinblick auf den Namen des Stifters den heiligen Antonius von Padua erblicken dürfen, zu dessen Attributen auch ein Buch gehört.[105]) Das ganze Kunstwerk hat eine Höhe von 0,29 m.

Darf ich zum Schluſs noch einen Wunsch aussprechen, so ist es der, daſs es der Königlichen Klosterkammer zu Hannover, der Eigenthümerin der Kreuzkirche, die bisher schon ihr groſses Interesse an der Wiederherstellung der Kirche thätig bewiesen hat, gefallen möge, die alten Theile der Kirche, namentlich die noch vorhandene Empore mit ihrem Triforium, ihren alten Fenstern und ihren verschiedenen Zugängen, sowie den Bogen vor der Vierung wieder in ihren Zustand herzustellen, die Reste der Bögen an der Nordseite des Hauptschiffes aber wenigstens soweit wieder zur Geltung kommen zu lassen, daſs sie, selbstverständlich verblendet, als Ergänzung des geöffneten Triforiums dienen und uns den alten Zustand der Kirche wieder vor Augen bringen könnten. Manches in diesem Aufsatze Gesagte fände dadurch vielleicht seine Bestätigung, manches auch vielleicht seine Berichtigung. Jedenfalls würden wir um ein nicht nur für die Kunstgeschichte Hildesheims werthvolles Denkmal reicher werden.

102) S. 11. 103) Krâtz, S. 12.

104) Müller und Mothes I, S. 66.

Quellen.

A. Archivalien.

1. Aus dem Königlichen Staatsarchiv zu Hannover die Archivalien: Kreuzstift zu Hildesheim Nr. 1, 297, Copialbuch VI, 67, Cal. Br. Arch. Des. 10, Generalia Nr. 62, Hildesheim. Des. 3, 8 Nr. 27, Vol. II, Vol. VI Jahrg. 1764, Jahrg. 1799, Des. 3, 8, III Nr. 28, Vol. IV Fasc. 1—28, Vol. V Fasc. 1—22.

2. Aus dem städtischen Archiv zu Hildesheim die Acten wegen Erbreiterung der Kreuzstraſse, II, W. 2, 3. Fach 176, Nr. 1.

3. Aus dem diplomatischen Apparat bei der Königlichen Universität zu Göttingen die Urkunde Nr. 70.

B. Druckschriften.

1. Bertram, Die Bischöfe von Hildesheim. Hildesheim 1896.

2. Ders., Geschichte des Bisthums Hildesheim. Bd. I. Hildesheim 1899; sieh auch Krâtz.

3. Büchner, Bischof Burchard II. von Halberstadt. Im Jahresbericht über das Gymnasium Fridericianum zu Schwerin von Ostern 1869 bis dahin 1870. Schwerin 1870.

4. Büttner Pfänner zu Thal, Anhalt. Bau- und Kunstdenkmäler. Dessau 1892.

5. v. Cohausen, Das Befestigungswesen der Vorzeit und des Mittelalters, herausgegeben von Max Jähns. Wiesbaden 1898.

6. Doebner, Urkundenbuch der Stadt Hildesheim. Band I—VIII. Hildesheim 1881—1899.

7. Ders., Zwei Relationen Bischof Friedrich Wilhelms von Hildesheim an den Papst über den Zustand seiner Diöcese, Zeitschrift des historischen Vereins für Niedersachsen, Jahrgang 1895. Hannover.

8. Ders., Relation Bischof Franz Egons von Hildesheim an den Papst Pius VI. vom 15. Dec. 1790. Daselbst Jahrg. 1896.

9. Euling, Chronik des Johann Oldecop in der Bibliothek des litterarischen Vereins in Stuttgart, Bd. 190. Tübingen 1891.

10. Floſs, Geschichtliche Nachrichten über die Aachener Heiligthümer. Bonn 1855.

11. v. Heinemann, Die Stiftskirche zu Gernrode und ihre Wiederherstellung. Bernburg 1865.

12. v. Heinemann, Geschichte und Beschreibung der Stiftskirche zu Gernrode in der Zeitschrift des Harzvereins für Geschichte und Alterthumskunde. Jahrgang 10. Wernigerode 1877.

Jähns, sieh Cohausen.

13. Krâtz, Kreuzkirche und Kreuzstift zu Hildesheim nach den Aufzeichnungen des Dr. Krâtz herausgegeben von A. B. (Bertram). Hildesheim 1892.

14. Lüntzel, Geschichte der Diöcese und Stadt Hildesheim, Band I—II. Hildesheim 1858.

15. Ders., Die Annahme des evangelischen Glaubensbekenntnisses von Seiten der Stadt Hildesheim. Hildesheim 1842.

16. Müller und Mothes, Illustrirtes archäologisches Wörterbuch der Kunst des germanischen Alterthums, Bd. I—II. Leipzig u. Berlin 1877—1878.

Oldecop, sieh Euling.

17. Scheidius, Origines Guelficae. Tom. III. Hannoverae 1752.

18. Seefselberg, Die frühmittelalterliche Kunst der germanischen Völker. Berlin 1897.

19. Stadler u. Hein, Vollständiges Heiligen-Lexikon. 5 Bände. Augsburg 1858—1862.

20. Viollet-le-Duc, Dictionnaire raisonné de l'architecture Française de XIe au XVIe siècle. Bd. VI. Paris 1875.

Zeitschrift, sieh 7, 8 und 12.

21. (Zeppenfeldt), Beiträge zur Hildesheimschen Geschichte. Bd. III. Hildesheim 1830.

Besonderen Dank habe ich der Direction des Königlichen Staatsarchivs zu Hannover und insbesondere Herrn Archivdirector Dr. Doebner zu sagen, deren gütiger Unterstützung ich die Benutzung zahlreicher wichtiger Archivalien verdanke, Herrn Prof. Dr. Kehr in Göttingen für die gefälligen Mittheilungen aus dem diplomatischen Apparat der Königlichen Universität zu Göttingen, Herrn Domcapitular Dr. Bertram in Hildesheim und Herrn Pastor Graen an der hier besprochenen Kirche, sowie dem Königlichen Baurath Herrn Herzig in Hildesheim für ihre liebenswürdige Unterstützung bei der Sammlung des Stoffes. Die Photographieen, welche den bildlichen Darstellungen zu Grunde liegen, rühren aus dem rühmlichst bekannten Atelier des Herrn Bödeker in Hildesheim, die Zeichnungen für die Abbildungen 3 bis 6 und 10 verdanke ich dem städtischen Bauführer Herrn Tebbe daselbst, die für die Abb. 9 und 11 Herrn Baurath Herzig.

Der Bau des Dortmund-Ems-Canals.

(Mit Abbildungen auf Blatt 28 bis 34 im Atlas.)

(Fortsetzung.)

III. Grunderwerb, Erd- und Befestigungsarbeiten.

A. Grunderwerb und sonstige Entschädigungen.

Die Grunderwerbsbreite für die gegrabenen Canalstrecken schwankt zwischen 55 und 90 m und vergröfsert sich in den gekrümmten Strecken um 10 bis 15 m. Hierzu kommt der Mehrbedarf für Häfen, Schleusen, Beamtenwohngebäude, Dienstländereien, Parallelwege usw. Für die gesamte Canalanlage sind aufser den seitens der gröfseren Städte für ihre Hafenanlagen besonders erworbenen Flächen 1748 ha Grund und Boden erforderlich geworden. Die Kosten haben einschliefslich der für die Leitung und Regelung des gesamten Grunderwerbsgeschäftes erforderlichen Geldaufwendungen im ganzen 8216000 ℳ betragen. Davon entfielen auf die Canalstrecke von Dortmund und Herne bis zur Ems bei Gleesen mit rd. 150 km 6563000 ℳ oder 43750 ℳ für das km; auf den erweiterten Emscanal von Hanekenfähr bis Meppen mit rd. 26 km, wo in den meisten Fällen fiscalisches Gelände zur Verfügung stand, 191000 ℳ oder rd. 7350 ℳ für das km, für die Emsstrecken von Meppen bis Papenburg mit rd. 61,5 km 705000 ℳ oder rd. 11460 ℳ für das km und schliefslich für die Strecke Oldersum — Emden einschliefslich des Vorfluthcanals mit 11,4 km 757000 ℳ oder 66400 ℳ für das km. Diese erheblichen Unterschiede erklären sich, abgesehen von den Nebenentschädigungen, durch den aufserordentlich verschiedenen Bodenwerth der durchschnittenen Gemarkungen. Im westfälischen Becken von Dortmund und Herne bis Bevergern stellt sich das Hektar durchschnittlich auf 4000 ℳ; für Acker- und Weideboden in der Industriegegend mufste als höchster Preis 20000 ℳ für das ha bezahlt werden, für Heideboden in der Gegend von Saerbeck als niedrigster Preis 180 ℳ. Für Gelände mit Bauplatzwerth, sowie für Hofraum und Hausgarten in der Nähe der gröfseren Städte steigt der Einheitspreis für das ha auf 21000 ℳ bis ausnahmsweise 40000 ℳ. Unterhalb Bevergerns nehmen die Preise in dem z. Theil recht öden Emslande bedeutend ab und stellen sich auf der Strecke bis Papenburg durchschnittlich auf 1300 ℳ für das ha; hier ist der höchste Preis für Wiese und Weide in der Lingener Gegend mit 4500 ℳ gezahlt, nur ausnahmsweise für Emswiese bei Tunxdorf 6800 ℳ und für Garten- und Ackerland bei Aschendorf 7500 ℳ für das ha, während der niedrigste Preis für Heideboden oberhalb Gleesens auf 100 ℳ für das ha herabsinkt. Die höchsten Durchschnittskosten erforderte der Marschboden Ostfrieslands mit 6600 ℳ für das ha; sein Preis schwankt zwischen 3500 und 7500 ℳ.

Selbstverständlich haben aufserdem noch mannigfache Nebenentschädigungen und Abfindungen gezahlt werden müssen für Wirthschaftserschwernisse, für Umwege, für den Minderwerth von Restgrundstücken, für Wasserentziehung oder Wasserzuführung, für Ueberstauungen auf der canalisirten Emsstrecke usw. Im ganzen beliefen sich diese Kosten auf etwa 2450000 ℳ.

Waren auch die Grunderwerbsverhandlungen auf freihändigen Ankauf gerichtet, so wurde doch das im preufsischen Enteignungsgesetz vom 11. Juni 1874 vorgeschriebene endgültige Planfeststellungsverfahren überall durchgeführt, um sowohl nöthigenfalls sofort die Enteignung einleiten zu können, als auch um eine sichere Grundlage für die hinsichtlich der Wege- und Vorfluthverhältnisse herzustellenden Anlagen zu gewinnen. Die Grunderwerbsverhandlungen wurden unter stetem Benehmen mit der örtlichen Bauleitung durch zwei rechtskundige Grunderwerbscommissare der Canal-Commission geführt, denen landwirthschaftliche Sachverständige zur Seite standen. Im ganzen ist mit 1763 Grundbesitzern verhandelt worden; eine Einigung ist in 1569 Fällen erzielt, sodafs 194 Enteignungen erfolgen mufsten. Mit vereinzelten Ausnahmen ist es überall gelungen, den Grund und Boden so rechtzeitig zu erwerben oder wenigstens die Bauerlaubnifs zu erhalten, dafs dadurch die Inangriffnahme der Bauarbeiten nicht verzögert wurde.

B. Erdarbeiten.

a) Eintheilung und Verdingung.

Die allgemeine Beschaffenheit des von der Canallinie durchschnittenen Geländes erhellt aus der im Abschnitt II B gegebenen Beschreibung der geologischen Verhältnisse. Die überwiegende Mehrheit der Erd-, Rodungs- und Böschungsarbeiten war an Unternehmer vergeben, im wesentlichen blieb nur ein Theil der Arbeiten auf der Strecke Oldersum — Emden dem Eigenbetriebe vorbehalten. Ebenso wurden die Baggerarbeiten auf der canalisirten Emsstrecke mit den für die spätere Unterhaltung von vornherein beschafften Baggern, deren Anzahl allmählich bis auf sechs Stück gebracht wurde, im Eigenbetriebe ausgeführt. War auch die Art der zu bewegenden Bodenmassen vor der Veranschlagung unter gleichzeitiger Ermittlung der Grundwasserverhältnisse überall genau bestimmt, so sicherte sich die Bauverwaltung den Unternehmern gegenüber dadurch, dafs in den Verträgen eine Gewähr für die Richtigkeit der angegebenen Bodenarten nicht übernommen wurde, um die Unternehmer vor Abgabe ihrer Angebote zu eigenen Untersuchungen zu veranlassen. Die streckenweise ausgearbeiteten Erdmassenberechnungen und -vertheilungen wurden, soweit angängig, in Lose getheilt, einerseits um auch kleineren Unternehmern die Abgabe von Angeboten zu ermöglichen, anderseits um die Lose je nach dem Fortschritt des Planfeststellungsverfahrens und des Grunderwerbs nöthigenfalls einzeln sofort in Angriff nehmen zu können. Dabei wurden jedoch benachbarte Lose oder möglichst alle Lose einer Strecke gleichzeitig ausgeschrieben, um durch Gesamtangebote auch die grofsen leistungsfähigen Unternehmer heranzuziehen. In einigen Strecken sind auch, wo es vortheilhaft erschien, mit den Erdarbeiten mehr oder weniger eng zusammenhängende Arbeiten, wie z. B. die Dichtungsarbeiten, Wege- und Uferbefestigungen, Sinkstücke und Packwerkarbeiten gleichzeitig verdungen, zuweilen auch die Ausführung der Düker, Brückenpfeiler und anderer kleinerer Bauwerke.

Eine Trennung der Massen nach der Bodenart hat im allgemeinen nicht stattgefunden, vielmehr wurde zur Verein-

fachung der Massenberechnungen für jedes Los die Abgabe eines Durchschnittspreises gefordert; nur da, wo der Boden auch nicht unter Wasserhaltung im Trocknen gewonnen werden konnte, wie z. B. bei der Erweiterung des alten Emscanals, sind für den Baggerboden besondere Kosten angesetzt. Dagegen ist überall eine Trennung der Kosten für Bodengewinnung und Bewegung grundsätzlich vorgenommen, um bei etwaiger Aenderung der Massenvertheilung ohne weiteres die veränderten Förderlängen berücksichtigen zu können. Die Gröfse der an einen Unternehmer vergebenen Lose ist sehr verschieden. Ihre Länge betrug auf den oberen Strecken bis Meppen im Mittel etwa 8 km mit 190 000 cbm Bodenmasse beim Los Hebewerk, bis über $2^1/_2$ Mill. cbm bei den vereinigten Losen Datteln Los 1, Lippe- und Stever-Uebergang; durchschnittlich belief sich die von einem Unternehmer zu bewegende Bodenmasse auf 850 000 cbm. In den Emsstrecken, wo die Umgehungscanäle und Durchstiche einzeln verdungen sind, betrug die Losgröfse nicht über 400 000 cbm.

Der Umfang der Erdarbeiten ist aus folgender Tabelle ersichtlich; darin sind die für die Strecke Hafen Dortmund und für den Emdener Hafen erforderlichen Arbeiten mitenthalten, während die Aushubmassen für die Baugruben der gröfseren Bauwerke und die städtischerseits für die Häfen bewegten Massen nicht eingerechnet sind.

Strecke	Länge km	Bodenbewegung im ganzen Mill. cbm	Bodenbewegung für 1 km durchschn. cbm
Von Dortmund und Herne bis Gleesen	149,8	16,03	107 000
Hanekenfähr bis Meppen	26,4	1,84	70 000
Canalisirte Ems von Meppen bis Herbrum	48,7	2,16	44 500
Emsstrecke von Herbrum bis Papenburg	12,6	1,20	95 000
Oldersum bis Emden	10,8	1,31*)	85 000 ohne Vorfluthcanal
Hafen zu Emden	—	0,78	—
im ganzen	248,3	23,32	89 200 ohne die gröfseren Häfen

b) Ausführung der Erdarbeiten.

Erforderte die Herstellung des Canalbettes überall, u. a. auch durch gehörige Aufrauhung des Bodens, gründliche Beseitigung der etwa vorhandenen Wurzeln, Stubbenreste, Drainröhren usw. besondere Sorgfalt, so waren namentlich bei der Schüttung der Dämme erhöhte Vorsichtsmafsregeln geboten. Die besten Bodenarten wurden auf die dem Wasser zugewandten Seiten vertheilt, oft auch Mischungen vorgenommen. Schüttung vor Kopf war unstatthaft; sie erfolgte stets in voller Breite in Schichten von durchschnittlich 0,30 m Stärke mit geringer Steigung (etwa 1:10) von der Mitte nach aufsen. Die einzelnen Schichten wurden mit 25 kg schweren Handrammen gestampft oder durchritten. Verwitterbarer oder sonst unbrauchbarer Boden, wie der nur durch Sprengen zu lösende Mergelfels, wurden möglichst zur Seite ausgesetzt. Da im Lippe- und Steverthal jedoch der Ersatz der grofsen Mergelmassen nur mit ganz unverhältnifsmäfsigen Kosten durch Beschaffung anderen Bodens möglich gewesen wäre, wurden durch Ausführung von Schürflöchern, Versuchsdämmen und Probestrecken eingehende Ermittlungen sowohl über die Standfähigkeit und Wasserdurchlässigkeit des Mergels als auch über die chemisch-physicalische Einwirkung des Wassers auf den Mergel angestellt.

Die Ergebnisse der Versuche lassen sich, wie folgt, zusammenstellen: Der steinige Mergel enthält aufser Sand und Thonerde kohlensauren Kalk, lösliche Kieselsäure und Spuren von Eisenoxydul in verschiedenen Mischungen, beispielsweise 20 v. H. Kalk, 11 v. H. Kieselsäure und 0,6 v. H. Eisenoxydul; er ist im bruchfeuchten Zustande im ruhigen Wasser beständig, zerbröckelt jedoch im fliefsenden Wasser, zerfällt beim Austrocknen an der Luft zu Pulver und bildet dann in Wasser gebracht einen Brei. Der weichere Mergel aus den oberen Schichten erwies sich, wenn gut gestampft, auch wasserfest, aber der Wasserzusatz durfte nicht zu grofs werden. Dafs die reinen Mergeldämme standsicher sind, zeigten schon die zahlreichen daraus hergestellten Eisenbahndämme; dagegen waren die aus Mergel und Sandboden schichtenweise hergestellten Dämme vollständig der Zerstörung durch Luft und Wasser unterworfen. Es kam also hauptsächlich auf den Abschlufs des Mergels gegen die Witterungseinflüsse durch Bekleidung mit undurchlässigen Thon- und Lehmschichten an. Sogenannte Dammerde allein konnte diesen Abschlufs nicht bewirken; sie war vielmehr nur als äufsere Bekleidung über der Lehmschicht aufzubringen. So entstand der in Text-Abb. 13 wiedergegebene Schüttungsquerschnitt für die Mergeldämme. Wo Mergel in die dem Hochwasser ausgesetzten Unterdämme verbaut werden mufste, war der Dammfufs durch eine vorgeschüttete, hinreichend befestigte Berme zu sichern. Ebenso war es nothwendig, die Dichtungsschichten beim Uebergange zum Einschnitt bis in den gewachsenen, standsicheren Mergel hineinzuführen. Zur Sicherung der Aufsenböschung gegen Abrutschen von der schlüpfrigen Lehmschicht und namentlich um auf der Wetterseite das Eindringen von gröfseren Wassermengen in den Mergelkern zu verhüten, war ursprünglich im Hinblick auf ähnliche Anlagen bei Eisenbahndämmen der Westerwald-

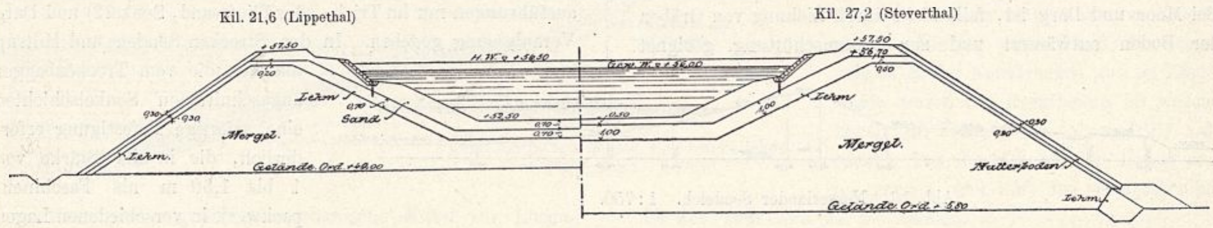


Abb. 13. Schüttung der Mergeldämme. 1 : 450.

*) Davon 0,39 Mill. für den Vorfluthcanal.

bahn noch die Anlage einer wasserabführenden Kiesschicht zwischen der Mutterboden- und Lehmschicht beabsichtigt. Doch wurde der hohen Kosten, der schwierigen Ausführung und der immerhin zweifelhaften Wirkung wegen zunächst von dieser Mafsnahme abgesehen. Der Erfolg ist nicht ungünstig gewesen, indem nur an einzelnen Stellen im Steverthal an der Nordwestseite gröfsere Rutschungen eingetreten sind. Diese Aufsenböschungen sind dann nachträglich durch eingelegte Bruchsteinbögen mit Pfeilern in Trocken-

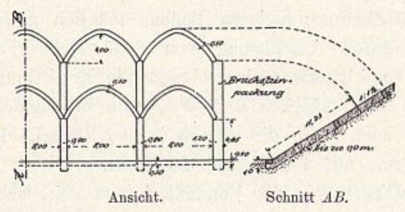


Abb. 14. Sicherung gerutschter Dammböschungen im Steverthal. 1 : 750

packung befestigt und entwässert (Text-Abb. 14); auch durch diagonale Faschinenlagen unter der Rasendecke ist der gleiche Zweck bei geringeren Rutschungen in der Strecke Waltrop erreicht.

Ueber die Versuche an Sanddämmen und in Einschnitten hinsichtlich der Wasserdurchlässigkeit soll bei den Dichtungen näheres gesagt werden. Zu erwähnen sind hier noch die bei den Sanddämmen stellenweise erforderlich gewordenen Verstärkungen des äufseren Dammböschungsfufses durch vorgeschüttete Bermen, um ein Ausweichen des Dammes zu

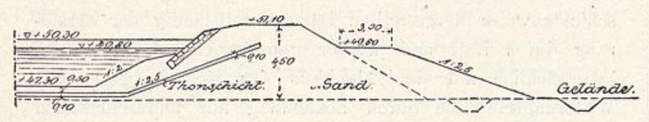


Abb. 15. Dammverstärkung bei Kil. 85. 1 : 400.

verhüten (Text-Abb. 15). Bei stark nachgebendem Boden wie im Senkungsgebiet des Bergbaues bei der Zeche Fürst Hardenberg und in der Nähe von Herne sind Nachschüttungen zur Dammverstärkung und Erhöhung nothwendig geworden. Beim Hafen Herne haben dieselben schon während der Bauzeit bis zu 1 m betragen. Doch sind Tagesbrüche wegen der z. B. bei der Zeche Fürst Hardenberg über 300 m starken überlagernden Mergeldecke ausgeschlossen. Bei Moor und Darg ist, falls nicht durch Ziehung von Gräben der Boden entwässert und zur Dammschüttung geeignet

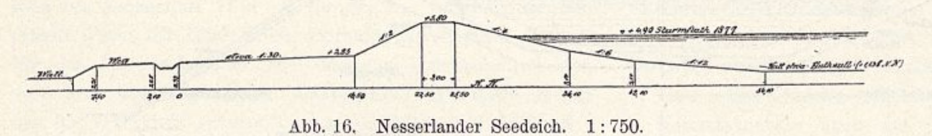


Abb. 16. Nesserlander Seedeich. 1 : 750.

gemacht werden konnte, eine Ableitung unter den Canaldämmen vorgenommen, wie z. B. im Glanethal (Torf und Moor); Schwierigkeiten sind in dieser Beziehung nur bei Schüttung des Seedeiches um das Spülbecken des Vorfluthcanals bei Nesserland, soweit er nicht auf Grünland, sondern auf dem Watt lag, entstanden (Text-Abb. 16). Um auf dem nachgiebigen Schlickboden des Watts überhaupt eine Förderbahn für den aus dem Emdener Binnenhafen gewonnenen Boden verlegen zu können, war die Vorstreckung einer Packwerkbuhne an dem äufseren Böschungsfufs entlang erforderlich; von hier aus erfolgte die Schüttung möglichst überall gleich hoch, um eine gleiche Druckvertheilung und gleichmäfsige Ueberströmung bei höheren Fluthen zu erzielen, in drei Jahresabschnitten. Zunächst gelang es trotz seitlicher Auftreibungen und Vorschiebung der Packwerkbuhne den Kleiboden bis über 2 m hoch aufzubringen und ihn durch eine vorübergehende obere Packwerklage und Bespreutung der Aufsenböschungen gegen die Winterfluthen zu sichern. Im folgenden Baujahr wurde dann durch Ziehen von Quergräben auf den Böschungen und dem vorliegenden aufgetriebenen Watt eine Austrocknung des Bodens vorgenommen, wodurch er standsicher, tragfähiger und auch leichter gemacht wurde, sodafs unter genügender Verbreiterung eine weitere Erhöhung von über 1 m gewonnen werden konnte. Erst im dritten Baujahr wurde der Deich, nachdem er während des Winters in derselben Weise gesichert war, entwurfgemäfs hergestellt und mit Rasensoden aus dem Aufsendeichlande, die im Salzwasser gedeihen, belegt. Seine Krone liegt auf

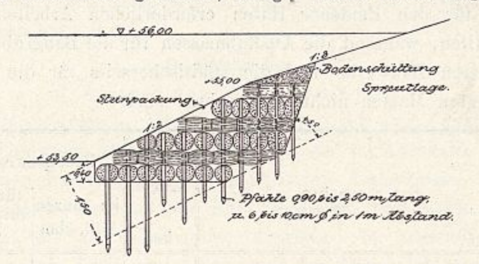


Abb. 17. Befestigung der inneren Böschungen im Senkel. 1 : 125.

+5,80 N. N. oder 0,90 m über der Sturmfluth von 1877 und etwa 4,70 m über Watthöhe. In die oberen Theile ist der aus der Baugrube des Nesserlander Siels und dem Binnenhafen gewonnene, etwas sandige, aber bündige und standsichere Kleiboden eingebaut. Nachträglich sind noch mit dem vorhandenen Baggergut aus dem Binnenhafen Verstärkungen gröfstentheils aufsendeichs vorgenommen, während der aufgetriebene und entwässerte Schlickboden auf der Binnenseite als Berme ausgebildet ist.

Die Bildung der Einschnitte und die Baggerungen auf den Emsstrecken haben, abgesehen von den Mergel- und Kalksteinfelssprengungen, letztere bei Riesenbeck in den Ausläufern des Teutoburger Waldes, zu bemerkenswerthen Bauausführungen nur im Trieb- oder Fliefssand, Senkel*) und Darg Veranlassung gegeben. In den Strecken Senden und Hiltrup machten die vom Trockenbagger angeschnittenen Senkelschichten eine sofortige Befestigung erforderlich, die in der Stärke von 1 bis 1,50 m als Faschinenpackwerk in verschiedenen Lagen eingebracht und durch Buhnenpfähle von 0,90 bis 2,50 m Länge gehalten wurde (Text-Abb. 17). An einzelnen Stellen ist dieser Packwerkkörper noch durch Steinschüttung beschwert oder mit Spreutlage versehen. In ähnlicher Weise ist auch in anderen Strecken verfahren, beispielsweise bei Datteln, wo das Faschinenpackwerk mit Würsten und

*) Ueber „Senkel" s. Abschnitt II B, S. 56.

Hakenpfählen befestigt, mit Kopfrasenschichten abgedeckt und gegen eine Pfahlreihe gestützt ist (Text-Abb. 18), und bei Holthausen (Text-Abb. 19), wo auch die obere Böschungskante durch eine Längsfaschine gesichert ist. An anderen Stellen ist die Kante durch eine Pfahlwand nach Text-Abb. 20 befestigt.

Abb. 18. Böschungsbefestigung im Triebsand. 1:125.

Im Gegensatz hierzu ist auf der Strecke Oldersum — Emden an den Stellen, wo der Darg angeschnitten wurde, der Aushub der untern Schichten bis zu 2 m Tiefe erst nach erfolgter Wasserfüllung des Canals durch Baggerung

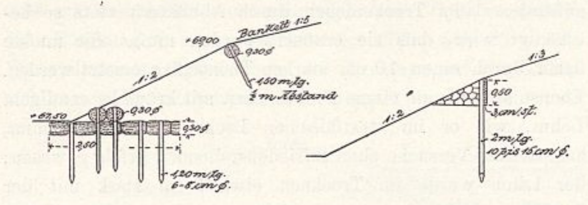


Abb. 19. Böschungssicherung im Fliefssand. 1:125. Abb. 20. Böschungssicherung im Emsland. 1:125.

geschehen, sodafs der Gleichgewichtszustand in dem dargigen Untergrund möglichst wenig gestört und das Auftreiben der Sohle und die Rutschung der Seitenböschung verhindert wurde. Wo sich in dem sehr feinen Sandboden der Emsstrecken die zweifache Böschung nicht standsicher erwies und eine Quellung nicht zu befürchten war, ist versuchsweise eine Bekleidung mit Sandbeton ausgeführt, der aus drei Schichten Sand in den Stärken von 5 bis 15 cm mit Wasserkalk (1 Theil Wasserkalk, 3 Theile Sand) oder Cementmilch hergestellt und mit einem Cementputz versehen wurde. Wegen der hohen Kosten dieser oder ähnlicher Befestigungsweisen ist jedoch in den Umgehungscanälen und Durchstichen der Emsstrecken, wie schon im Abschnitt II D, d (S. 67) erwähnt, vorgezogen, die Böschungen auf 1:3 abzuflachen und nur auf dem einspringenden Ufer durch Buschmatratzen zu sichern (Text-Abb. 21).

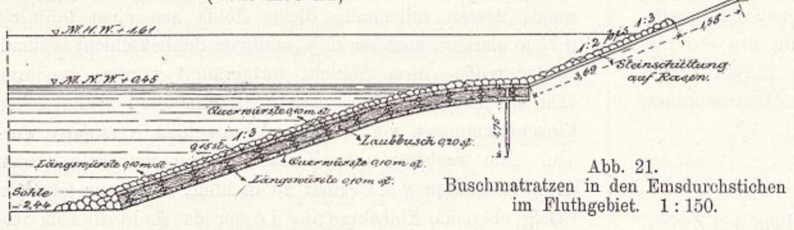


Abb. 21. Buschmatratzen in den Emsdurchstichen im Fluthgebiet. 1:150.

Neue und eigenartige mechanische Mittel zur Lösung und Förderung des Bodens sind nicht zur Anwendung gekommen. Wo es anging, wurde der Boden durch Trockenbagger der Lübecker oder Couvreurschen Bauart gelöst. Soweit der feste Mergelstein zu hart für die Baggereimer sich erwies, wurde er mit der Hand gelöst oder gesprengt und durch Trockenbagger in die Fördergefäfse verladen. Ein ausnahmsweise zu diesem Ladegeschäft benutzter englischer Löffelstielbagger erwies sich infolge seiner Schwerfälligkeit wenig geeignet. In dem Marschboden Ostfrieslands konnten bei dem wenig tragfähigen Boden schwere Maschinen nur in beschränktem Mafse zur Anwendung kommen. Im allgemeinen konnte die Lösung des Bodens im Trocknen ausgeführt werden, in den Emsstrecken allerdings zum Theil unter Wasser-

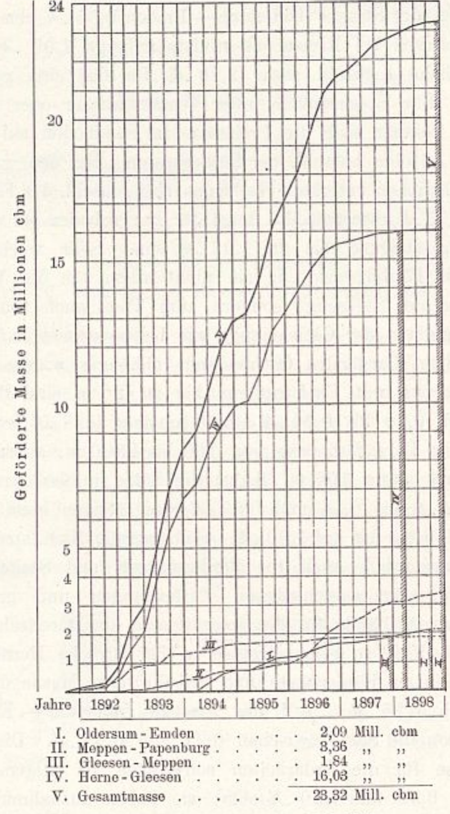


Abb. 22. Fortschritt der Erdarbeiten.

haltung. Die Beseitigung der Erdmassen erfolgte meist auf Förderbahnen mit Locomotivbetrieb, in den Emsstrecken auch zu Wasser.

Die Erdarbeiten sind im gröfseren Umfang im Herbst 1892 begonnen. In den Hauptbaujahren 1893 bis 1896 wurden durchschnittlich 4,8 Mill. cbm jährlich gefördert. Bei den einzeln zur Verdingung gestellten Losen sind Wochenleistungen bis zu 10000 cbm zu Grunde gelegt. Bis auf einen Theil der Baggerungen in den Emsstrecken und im Emder Hafen waren die Erdarbeiten im wesentlichen mit Schlufs des Jahres 1897 vollendet. Der Fortschritt der Erdarbeiten im ganzen und auf den Hauptstrecken ist aus Text-Abb. 22 zu ersehen.

Die Einheitspreise sind durchweg getrennt nach Gewinnung und Förderung berechnet derart, dafs zur Gewinnung auch das Einbauen in die Dämme oder das Aussetzen zur Seite und die Einebnungsarbeiten gerechnet sind. Im allgemeinen zeigt sich eine Abnahme der als Durchschnittspreis angesetzten Gewinnungskosten von Dortmund und Herne ausgehend bis zu den Emsstrecken dem geologischen Alter der Bodenschichten entsprechend; sie betrugen beispielsweise:

in dem schweren Lehmboden der Strecke Herne 0,63 bis 0,65 ℳ/cbm, im Mergelboden bei dem Lippe- und Steverübergang 0,70 bis 0,80 ℳ/cbm, dagegen im Sandboden der Strecke Hesselte, bei Meppen und dem Umgehungscanal bei Düthe, soweit der Boden im Trocknen ohne Wasserhaltung zu gewinnen war, nur 0,25 bis 0,30 ℳ/cbm, im Klei- und Dargboden der Strecke Oldersum — Emden 0,35 ℳ/cbm. Im Kalksteinfelsen bei Riesenbeck mufste anfangs 1,00 ℳ, für nachträgliche Arbeiten sogar 2,20 ℳ für das cbm gezahlt werden. Für Bodenaushub unter Wasserhaltung oder durch Baggern beliefen sich die Preissätze im Sandboden auf 0,50 bis 0,60 ℳ/cbm ausschl. der Förderkosten. Bei den grofsen Emsdurchstichen unterhalb Herbrums sind einschl. der Förderkosten 0,75 ℳ/cbm gezahlt, desgl. für Baggerboden bei weiter Förderung steigend bis zu 1,02 ℳ/cbm. Sehr wechselnd waren die Förderpreise, da sie nicht allein von der Wegelänge und der Steigung, sondern zum Theil auch von den Schwierigkeiten der Gleislegung, wie beispielsweise auf dem nachgiebigen Dargboden Ostfrieslands abhängig waren. Für Querförderung mit Entfernungen bis zu 20 m sind durchschnittlich 0,10 bis 0,20 ℳ und höchstens 0,28 ℳ bezahlt; für weitere Längsförderung von 100 bis 2500 m, ausnahmsweise auch unter 100 m, liegen die Sätze in den Grenzen von 0,12 ℳ bis 0,55 und 0,63 ℳ und steigen beim alten Emscanal sogar bis auf 1,00 ℳ. Selbstverständlich sprachen hierbei wesentlich auch die Fördermassen und Steigungen mit. Bei sehr verschiedenen Entfernungen und grofsen Massen wurde häufig für die Gesamtmasse ein Durchschnittspreis gefordert, so beispielsweise in der Strecke Herne bei 50 bis 6200 m Förderweite und 425 000 cbm Masse durchschnittlich 0,25 ℳ. Auf der Strecke Oldersum — Emden schwankten die Sätze zwischen 0,21 und 0,85 ℳ. Die Gesamtpreise für die Erdarbeiten schwanken im allgemeinen zwischen 0,50 und 1,20 ℳ/cbm; sie haben ausnahmsweise nur 0,40 und 0,35 bei leichtem Sandboden, bei grofsen Förderlängen und im Kalksteinfels 1,50 und sogar 2,65 ℳ betragen. Der Durchschnittspreis für den ganzen Canal stellt sich auf 0,83 ℳ/cbm ausschl. der gewöhnlichen Böschungsarbeiten, für welche im allgemeinen für das qm 0,20 ℳ, vielfach auch weniger bis herab zu 0,10 ℳ und ausnahmsweise zu 0,05 ℳ/qm bezahlt wurden. Der Durchschnittspreis auf das cbm Bodenbewegung umgerechnet ergiebt sich zu ungefähr 0,11 ℳ, sodafs sich der für Erd- und Böschungsarbeiten gezahlte Gesamtpreis auf 0,94 ℳ für das cbm beläuft. Die Erd- und Böschungsarbeiten mit 21 844 760 ℳ haben $27\frac{1}{2}$ v. H. der gesamten Ausführungskosten beansprucht.

c) Schwierige Dichtungsarbeiten.

Die Dichtungsarbeiten verfolgten nicht allein den Zweck, den Wasserbedarf des Canals herabzumindern und die Standfestigkeit der aus durchlässigen Bodenarten geschütteten Canaldämme zu sichern, sondern auch die Verwässerung der anliegenden Ländereien zu verhüten. Bei der grofsen Wichtigkeit dieser Aufgaben sind, um die zweckmäfsigsten und je nach der Oertlichkeit billigsten Verfahren zu ermitteln, wie schon im vorhergehenden Abschnitt angedeutet, umfangreiche Versuche angestellt. Da ein näheres Eingehen auf diese Versuche zu weit führen würde, soll ihr Ergebnifs kurz zusammengefafst werden. Zunächst erwies sich das ursprünglich vorgesehene Einschlämmen von Thon, Lehm oder Emsschlick auf die Sohle und die Böschungen im Gegensatz zu den anderweit, beispielsweise am Oder-Spreecanal,*) mit diesem Verfahren gemachten guten Erfahrungen bei dem sehr feinen aber durchlässigen Sandboden des Emsthales nicht als erfolgreich. Auch die wiederholte Einschlämmung dünner, nur einige Millimeter starker Lagen, die unter Umständen wirksamer ist, als eine stärkere Schicht, ebenso wie der Versuch, durch nachträgliches Festschlagen gröfsere Dichtigkeit zu erreichen, war erfolglos, indem die Versickerungsmenge noch nicht um 25 v. H. vermindert und Rutschungen nicht verhindert wurden. Der Grund wird trotz sorgfältigen und sachgemäfsen Einbringens darin zu suchen sein, dafs in den festgelagerten feinen Sand keinerlei Thon oder Lehmtheile eindringen können. Dazu kommt, dafs diese dünne Schlämmschicht dem Fortspülen durch Wellenschlag ausgesetzt ist und aufserdem beim Trockenlegen durch Abblättern stets so beschädigt wird, dafs sie erneuert werden mufs. Sie mufste daher durch einen 10 cm starken Thonschlag ersetzt werden. Ebenso sind die an einem Probebecken mit krümelig sandigem Lehm, wie er im westfälischen Becken öfters vorkommt, angestellten Versuche ohne zufriedenstellenden Erfolg gewesen; der Lehm wurde im Trocknen etwa 5 cm stark mit der Schaufel eingebracht und mit einer etwa 10 m starken Sandlage überdeckt, die mit Schlägeln angeschlagen wurde. Diese Dichtungsart ist denn auch nur auf einer kurzen Strecke dicht oberhalb der Schleuse bei Riesenbeck als Sohlendichtung in dreifacher Lage über einander ausgeführt. Andere Versuche im grofsen, eine aus Sand und Lehm gemischte Schicht einzuschlämmen, mifsglückten, da bei dem Versinken eine Entmischung und demzufolge schichtenweise Ablagerung der Bestandtheile stattfand. Die Art und Weise des Einschlämmens ist verschieden erfolgt, sowohl vom Flofs aus durch die Fugen, als auch aus Holzbalgen mit Bodenstöpseln und durch Aufbringen auf die Eisdecke. Das Einschlämmen bildet das einzige Mittel nachträglicher Dichtung bei gefülltem Canal, kann aber nur als eine Beförderung der Selbstdichtung angesehen werden, die sich durch allmähliche Filterung der im Wasser schwebenden Stoffe vollzieht. In welchem Mafse solche Dichtung sich bildet, zeigte sich bei der Sohlenvertiefung im alten Emscanal, dessen vollständig dichte Sohle aus einer 0,50 bis 0,75 m starken, mageren d. h. sandigen Schlickschicht bestand. Leider mufste diese Schicht fortgeräumt werden, wodurch dann die umfangreichen, aber nicht genügend erfolgreichen Einschlämmungen von Thon und Emsschlick veranlafst wurden. Ein nachträglicher Versuch, einen undichten Damm durch Eingiefsen von Cement zu dichten, hatte nur geringen Erfolg, da beim Einbohren der Löcher das Erdreich sich verdichtet und das Eindringen des Cements verhindert.

Auf allen den Strecken, wo es auf eine wirksame Beseitigung der Sickerverluste ankam, ist daher von vornherein oder nachträglich die Einbringung einer besonderen Dichtungsschicht im Trocknen erfolgt. Diese Schicht besteht, soweit sie als Sohlen- oder Böschungsdichtung im Einschnitt oder bei niedrigen Dämmen dient, deren Standsicherheit

*) S. Centralbl. d. Bauv. 1895 S. 100.

unbedenklich erschien, aus einer 0,10 bis 0,50 m starken Lage Thon- oder Lehmschlag und einer Ueberdeckungsschicht aus möglichst reinem Sand oder Mutterboden, deren Stärke bis zu 0,15 m (ausnahmsweise bei nachträglicher Dichtung

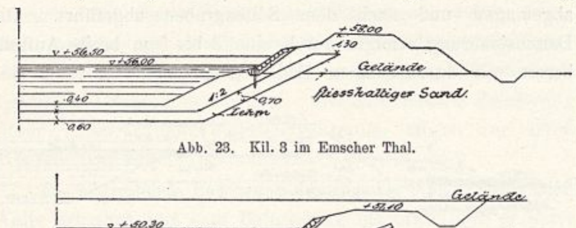


Abb. 23. Kil. 3 im Emscher Thal.

Abb. 24 Kil. 79 bei Greven.

Abb. 23 u. 24. Dichtung in durchlässigem Boden. 1 : 400.

0,05 m) herabgeht, durchschnittlich aber 0,30 m und in den Böschungen noch mehr beträgt (Text-Abb. 23 u. 24). Wo stellenweise Rutschungen der Decklage auf der Lehmdichtung der Innenböschungen eintraten, ist eine Steinschüttung

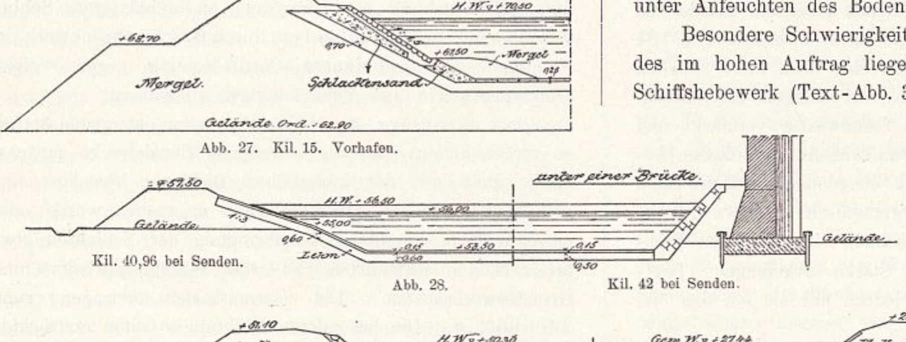


Abb. 27. Kil. 15. Vorhafen.

Kil. 40,96 bei Senden. Abb. 28. Kil. 42 bei Senden.

Kil. 78,5. Emsthal. Abb. 29. Kil. 137,5 bei Gleesen.

Abb. 27 bis 29. Dichtung durch vollständige Auskofferung im Auftrage. 1 : 400.

von 0,30 m Stärke zum Schutz eingebracht. Diese Dichtungen verfolgen, insbesondere soweit sie nicht unter der Sohle durchgeführt sind, gleichzeitig den Zweck, die aus nicht genügend undurchlässigem Material geschütteten Dämme standsicher zu machen. Dämme erscheinen vorwiegend gefährdet, sobald die sog. Versickerungslinie, d. h. die Linie, bis zu welcher vom Canalwasserspiegel ausgehend eine vollständige Durchfeuchtung des betreffenden Schüttungsmaterials eintritt, aus der äuſseren Böschung des Dammes heraustritt. Je nach der Durchlässigkeit des gewachsenen Bodens und der Beschaffenheit der Schüttungsstoffe sind in solchen Fällen Dichtungsschichten entweder nur in den Seitenwandungen (Text-Abb. 25 u. 26) mit wechselnder Stärke von 0,10 bis 0,70 m und mit verschiedener Neigung, oder vollständige Auskofferungen des ganzen Canalbetts vorgenommen (Text-Abb. 23 u. 24, 27 bis 29). Wenn die Dichtungsschichten nicht ganz durchgeführt werden, müssen sie möglichst bis in den undurchlässigen Boden hinabgeführt und in diesen eingebunden werden. In den höheren Aufträgen, d. h. bei Lage der Canalsohle über Gelände, ist eine vollständige Auskofferung durch eine starke Thonschicht sowohl bei Sandboden, wie im Ems- und Glanethal, als vor allem auch bei den Mergeldämmen im Lippe- und Steverthal und oberhalb des Schiffshebewerks

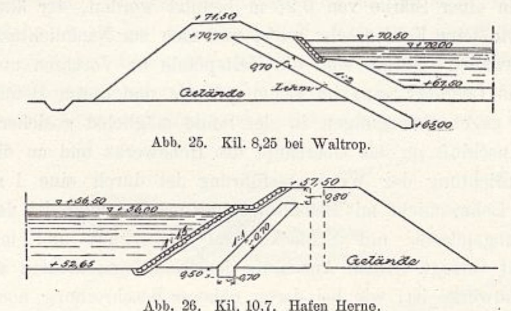


Abb. 25. Kil. 8,25 bei Waltrop.

Abb. 26. Kil. 10,7. Hafen Herne.

Abb. 25 u. 26. Dichtung der Dämme u. Seitenwandungen. 1:400.

erforderlich gewesen. Das Nähere über die Mergeldämme ist bereits oben unter b gesagt. Die Stärke der Dichtungsschicht wechselt je nach der Güte des Materials von 0,50 bis 1 m; in den meisten Fällen genügte 0,70 m. Die Einbringung ist in zusammenhängenden Schichten von je 0,10 m unter Anfeuchten des Bodens und Stampfen ausgeführt.*)

Besondere Schwierigkeiten entstanden bei der Dichtung des im hohen Auftrag liegenden oberen Vorhafens für das Schiffshebewerk (Text-Abb. 30). Hier liegt die auf 3,50 m vertiefte Canalsohle noch durchschnittlich 3 m über dem Gelände und zwar auf über 600 m Länge; der Damm muſste aus Mergelfels geschüttet werden, und Sand fehlte fast vollständig, sodaſs die Innenböschungen steilere Anlage und vollständige Abpflasterung erhielten. Nachdem das starke Setzen der Dämme möglichst lange abgewartet und für die genügende

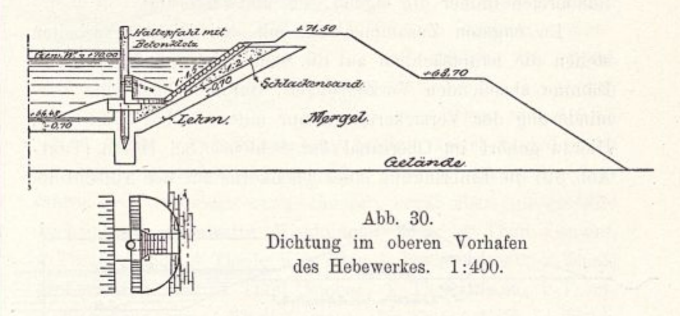


Abb. 30. Dichtung im oberen Vorhafen des Hebewerkes. 1:400.

Verwitterung des Mergels durch Ueberwintern gesorgt war, wurde die 0,70 m starke Dichtungsschicht aus bestem Lehm

*) Ueber nachträgliche Beseitigung von Durchquellungen infolge übersehener Drainrohre s. Centralblatt der Bauverwaltung 1901 S. 18.

eingebaut und dann eine allmähliche und wiederholte Füllung mit Wasser vorgenommen, um das Setzen zu beschleunigen und die vorgekommenen Durchquellungen aufzusuchen und zu beseitigen. Zur Ueberdeckung ist dann scharfer Schlackensand in einer Stärke von 0,25 m benutzt worden, der ähnlich wie feine Kohlenasche wirkt und sich zur Nachdichtung gut bewährt. Ferner sind die Haltepfähle im Vorhafen und für das Leitwerk ganz im Lehm gebettet und durch Betonklötze gegen Bewegungen in der Sohle möglichst gesichert. Der Anschlufs an das Oberhaupt des Hebewerks und an die Monierdichtung der Wegeunterführung ist durch eine 1 m starke Lehmschicht mit Betonbedeckung erfolgt; auch ist das Böschungspflaster mit Schlackensand unterstopft und mit Cement verfugt. Beim Anschlufs der Dichtungsschichten an die Bauwerke ist, wie bei deren näherer Beschreibung noch erörtert werden soll, allerwärts mit besonderer Sorgfalt verfahren; auch bei den Uebergangsstrecken vom gedichteten Auftrag in ungedichteten Abtrag ist die Dichtungsschicht tief in den Einschnitt hineingeführt, um die Bildung von Längsadern zu verhüten.

Eine besondere Dichtungsart ist hier noch zu erwähnen, die nachträglich nach Füllung des Canals ausgeführt werden mufste, um die Verwässerung daneben gelegener Ländereien möglichst abzustellen. Es zeigte sich zwischen Kil. 104 und 105 bei Riesenbeck ein von rechts nach links ziemlich steil abfallender Grundwasserstrom, der mangels einer besonderen Sohlendichtung durch das Canalwasser verstärkt und gehoben wurde. Hier ist der Grundwasserstrom, dessen Anstauung wegen des rechts stark steigenden Geländes kein Bedenken hatte, durch einen bergmännisch bis etwa 0,60 m in die feste undurchlässige Sandschicht eingetriebenen Dichtungskern aus Thon von 1 m Stärke abgefangen (Text-Abb. 31). Dies Verfahren kann jedoch nur als ein den örtlichen Verhältnissen angepafster Nothbehelf angesehen werden, da nur eine angemessene Dichtungsschale, über die ganze Sohle im Trocknen eingebracht, den Erfolg sichert. Sehr wichtig ist natürlich für die unter Verwässerung leidenden Ländereien immer die eigene gute Entwässerung.

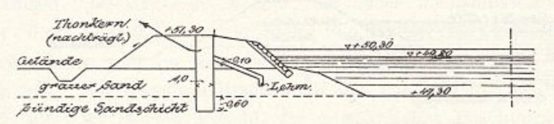


Abb. 31. Abfangen des Grundwasserstroms. 1:400.

Im engsten Zusammenhang mit den Dichtungsarbeiten stehen die hauptsächlich auf die Standsicherung durchnäfster Dämme abzielenden Vorkehrungen, durch welche eine Verminderung der Versickerungen nur mittelbar bezweckt wird. Hierzu gehört im Obercanal der Schleuse bei Düthe (Text-Abb. 32) die Einbringung eines Thonkerns auf der Aufsenseite des Deiches und die Vorschüttung einer stützenden Erdberme. Bei dem Durchstich neben dem Lingener Hafen und im Parallelcanal bei Varloh, wo die Dämme aus Triebsand bestehen, ist auf den inneren Böschungen auch torfiger Moorboden mit Erfolg zur Abdichtung benutzt. Auch wurde hier durch eine starke Längsfaschine am äufseren Dammfufs und durch Querfaschinen, die in 2 bis 5 m Abstand gelegt wurden, das Druckwasser abgefangen und nach dem Seitengraben abgeführt. Die Dammsicherung erfolgte durch eine 3 bis 5 m breite Aufsenberme mit durchlässigem Boden (Text-Abb. 33). Wo sich stellenweise ein Ausweichen der ganzen Dammböschung bis zur Leinpfadkante hin zeigte, ist noch eine schwache Spundwand eingerammt, die den alten Dammfufs stützen, dem Sickerwasser durch Oeffnungen mit vorgelegter Längsfaschine jedoch freien Abzug lassen soll. Schliefslich ist ein besonderer Fall der Dichtung erwähnenswerth, wo es sich in der Strecke Hiltrup um die Abhaltung äufseren Hochwassers von der Durchdringung des Canaldammes handelt. Hier ist, ähnlich der in Abb. 32 dargestellten Anordnung, unter der äufseren Böschung ein Kern aus undurchlässigem Schluff eingebracht, um die aufserdem durch Faschinenpackwerk im Fliefssand befestigte innere Canalböschung gegen weitere Durchquellungen und Verdrückungen zu sichern.

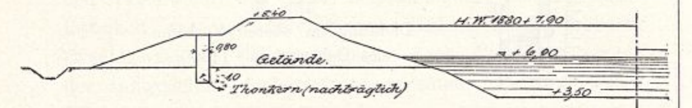


Abb. 32. Dammsicherung im Obercanal der Schleuse bei Düthe. 1:400.

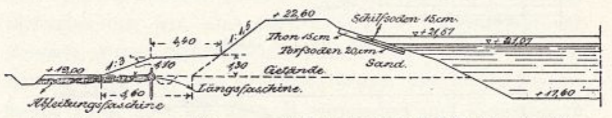


Abb. 33. Dammverstärkung und Entwässerung bei Varloh. 1:400.

Die Ermittlung der Dichtungskosten ist grundsätzlich so vorgenommen, dafs die betreffende Canalstrecke zunächst ohne, dann mit der künstlichen Dichtung berechnet und der Unterschied als Dichtungskosten angesehen wurde, also einschliefslich der für die Einbringung der Schichten etwa erforderlichen vermehrten Erd- und Böschungsarbeiten und Grunderwerbskosten. Die Gesamtkosten betragen rund 3400000 ℳ. Die besonderen Dichtungsarbeiten erstreckten sich im ganzen auf etwa 70 km Canallänge. Hiervon erhielten etwa 32 km mehr oder weniger vollständige Sohlen- und Seitendichtungen, 28,5 km eine Dichtung der Dämme und Seitenwandungen und 9,5 km eine Einschlämmung und Dammsicherung. Die Einheitskosten sind im einzelnen sehr verschieden, je nach der Stärke und Anordnung der Dichtungsschicht und je nachdem der Dichtungsboden aus den Aushubmassen zur Verfügung stand, oder besonders beschafft werden mufste. Eine Vertheuerung der Herstellungsarbeiten trat auch ein, wo die Dichtungsschicht theilweise mit Baggerung nachträglich eingebaut wurde. Als Durchschnittskosten für das km gedichtete Canallänge sind etwa folgende Beträge anzusehen:

1. für vollständige Sohlen- und Seitendichtung während der Bauausführung für das km 65000 ℳ
2. für Seitendichtung allein während der Bauausführung für das km . . . . . . 11000 „
3. für nachträgliches Einbringen einer Sohlen- und Seitendichtung in den unteren Böschungstheilen für das km etwa . . . 85000 „
4. für nachträgliches Einbauen eines Thonkernes in die Seitendämme ohne Betriebsstörung für das km . . . . 60000 „
5. für Einschlämmen von Thon für das km rund 7000 „

Die Kosten für Beschaffung von 1 cbm gutem plastischen Lehm oder Thon betrugen 3,25 bis 6 ℳ.

C. Befestigung der Ufer und Böschungen.

Auch hinsichtlich der zu wählenden Sicherung der Canalufer gegen den Wellenschlag und die durch den Schiffsverkehr hervorgerufene Wasserbewegung sind eingehende Versuche mit den verschiedensten Befestigungsweisen angestellt, welche sich sowohl auf die Verwendung natürlicher oder künstlicher Steindecken, als auch von im Wasser gedeihenden Pflanzen erstreckten. Da eine nähere Erörterung dieser Versuche hier unterbleiben mufs, mögen nur deren wesentlichste Ergebnisse mitgetheilt werden.

Die angreifende Bewegung der sich bis 0,35 m senkenden Welle erfordert nur eine Befestigung bis etwa 0,60 m unter Wasserspiegel; sie reicht nicht bis zu 1 m Tiefe herab, sodafs ein Abbrüchigwerden der Böschung in dieser Tiefe durch Wellengang nicht mehr, wohl aber durch Unterspülung eintreten kann. Daher empfiehlt sich, wie auch die Erfahrung an belgischen und holländischen Canälen lehrt, in dieser Tiefe die Anlage einer Berme von etwa 2 m Breite, die je nach der Bodenart, wenn überhaupt, nur einer leichten Befestigung bedarf. Als günstige Neigung für die Befestigung ergaben sich die Grenzwerthe von 1:1 bis $1:1^3/_4$. Für die Höhe der Befestigung zeigte sich das Mafs von etwa 0,30 m über dem Wasserspiegel als ausreichend, da die Welle nicht höher als 0,20 m aufläuft. Für die Wahl der Befestigungsweise waren neben der selbstverständlichen Kostenfrage eine genügende Standfestigkeit bei gleichzeitiger Nachgiebigkeit für Verschiebungen und Versackungen, sowie die Frostbeständigkeit und die Möglichkeit einer bequemen und billigen Unterhaltung mafsgebend. Nach diesen Gesichtspunkten entstanden die in den Text-Abb. 34 bis 39 dargestellten Hauptformen. Die in Abb. 39 wiedergegebene Uferdeckung ist bei den Umgehungscanälen in den Emsstrecken ausgeführt; auch hat an einzelnen anderen Stellen in der Strecke von Herne bis Meppen die natürliche Befestigung durch Anpflanzung, zum Theil mit Steinschrottbedeckung genügt. In dem festen Kleiboden Ostfrieslands, welcher sich noch bei Neigungen von 1:0,5 als standsicher erweist, konnte von einer besonderen Befestigung aufser dem natürlichen Pflanzenwuchs auf der freien Strecke überhaupt abgesehen werden. Ebenso sind auch die im festen Mergelstein liegenden Böschungen unbefestigt geblieben. Hier wurde, sobald durch den Wellenangriff und die Witterungseinflüsse die allmähliche Verwitterung weit genug vorgeschritten war, eine Steinschüttung in die ausgespülten Rinnen eingebracht. Bei Abgrabungen oder an abbrüchigen Ufern auf den freien Emsstrecken sind, soweit nicht Buhnen und Grundbetten aus Faschinen eingebaut wurden, die Sicherungen durch Weiden- und Schilfpflanzung oder durch Buschwerk und Stakpfähle mit Spreutlage in der an der Ems üblichen Bauweise erfolgt.

Die normale Uferbefestigung (Text-Abb. 34) ist in der Neigung $1:1^1/_4$ ausgeführt und reicht von 0,60 m unter dem niedrigsten bis 0,27 oder 0,40 m (je nach Ausbildung der oberen Berme) über den höchsten Wasserstand; sie ist also in den Strecken mit angespanntem Wasserspiegel 0,50 m höher als in den übrigen. Die Unterwasserberme hat am Fufs der Böschung bis zur Vorderkante eine Querneigung von 1:5 erhalten. Die Befestigung ist 0,40 m stark und besteht aus der i. M. mit 0,12 m Stärke angesetzten Unterbettung aus Steinbrocken und den i. M. 0,28 m starken Decksteinen, deren gröfste Abmessungen bei sonst beliebiger Form 0,35 m nicht überschreiten; sie sind mit den Köpfen nach aufsen lagerhaft verpackt und in den Fugen sorgfältig verzwickt. Plattenartige Steine sind bis zu einer Mindeststärke von 8 cm zugelassen. Die Sicherung des Fufses ist je nach der Bodenbeschaffenheit verschieden ausgeführt; in festem gewachsenen Boden hat allein eine Kleinschlagschüttung genügt. Bei senkeligem oder triebsandartigem Boden ist der

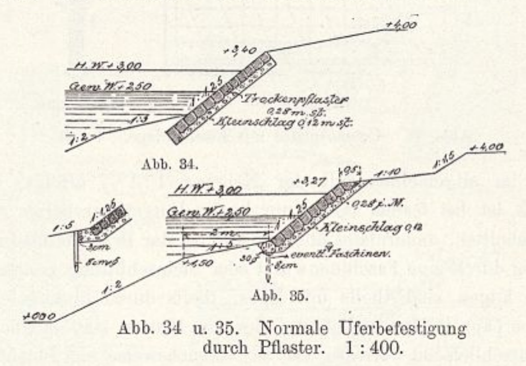


Abb. 34 u. 35. Normale Uferbefestigung durch Pflaster. 1:400.

Fufs nach Text-Abb. 35 durch eine mit Pfählen befestigte starke Faschinenwurst gestützt; im aufgeschütteten Sandboden theilweise durch eine Pfahlwand mit festgenageltem Brett vor dem Schotterkoffer. Wo Dichtungsschichten das Einschlagen von Pfählen nicht zuliefsen, ist der Fufs durch Steinpackung oder durch Hinabführen in den Boden der Berme hinein bis zur Tiefe von 1 m unter Wasser gesichert. Herausgestellt hat sich dabei, dafs es, um der Sandausspülung infolge des fortschreitenden Wellenkammes und der nach unten gerichteten Saugewirkung des Wellenthales entgegenzuwirken, am besten wäre, die durchgehenden Fugen über Wasser lothrecht, unter Wasser dagegen wagerecht anzuordnen.*)

Eine Befestigung mit Cementplatten zeigen die Text-Abb. 36 und 37. Die Herstellung der Platten ist nur an solchen Stellen unmittelbar an der Verwendungsstelle erfolgt, wo geeigneter Sand vorhanden oder leicht zu beschaffen war. Die Platten haben durchweg eine Stärke von 8 cm bei 1,1 bis 1,2 m Länge und 0,4 bis 0,5 m Breite. Ihre Herstellung erfolgte meist in gedeckten Räumen in liegenden oder stehenden Rahmen; das letztere Verfahren war allerdings etwas theurer, ergab aber eine gröfsere Dichtigkeit. Bewährte Mischungen sind: 1 Theil Cement, 2 Theile Sand, 3 Theile Kies oder 1 Theil Cement, 3 Theile grober Sand oder 1 Theil Cement, 2 Theile Sand, 2 Theile Kohlenasche oder 1 Theil Cement, $^3/_4$ Theile Kalk, 4 Theile Sand. Die Anfertigungskosten allein beliefen sich durchschnittlich auf 2,50 ℳ für das qm. Da, wo die Cementplatten auf der

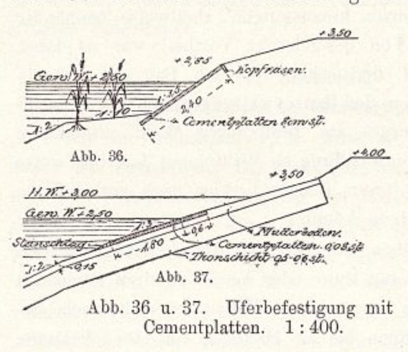


Abb. 36 u. 37. Uferbefestigung mit Cementplatten. 1:400.

*) Am Rhein und an der Mosel werden bei starker Strömung die Steinpackungen vielfach mit lothrechten Fugen ausgeführt.

dreifachen Böschung über der Dichtungsschicht verlegt wurden, sind sie behufs fester Lagerung in den Abmessungen von 1,80 zu 0,60 m hergestellt und, um sicher an die Verwendungsstelle geschafft werden zu können, mit Eiseneinlagen von hochkantig gestellten Flacheisen von 20 × 2 mm Stärke versehen, die mit 2 mm starkem, zickzackartig umgewickelten Draht verbunden sind (Text-Abb. 38). Das Verlegen der Platten

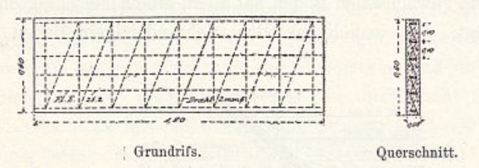


Abb. 38. Cementplatte mit Eiseneinlage. 1 : 40.

ist im allgemeinen mit der Neigung $1:1^1/_2$ erfolgt, der Fufs ist bei festem Boden nur in die Unterwasserberme eingeschnitten, andernfalls ähnlich wie bei der Bruchsteinbefestigung durch eine Faschinenwurst oder Steinschüttung gesichert. Die Fugen sind theils mit Moos, theils durch hintergelegte Theerpappstreifen gedichtet, oder die Platten sind möglichst dichtschliefsend verlegt. Da wo versuchsweise ein Betonfufs oder stellenweise unter Wasser bis zur Frostgrenze Sandbeton verwandt ist, wurde durch Sickerschlitze für ein Entweichen des Wassers aus dem Erddamm Vorsorge getroffen. Oben sind die Platten durch eine Kopfrasenschicht abgedeckt. Ueber die auch zur Anwendung gelangte Befestigung mit Stampfbeton nach Möllers Patent mag auf die Veröffentlichungen im Centralblatt der Bauverwaltung Jahrgang 1895 S. 240, 276, 286; 1898 S. 425, 499; 1899 S. 72, 283, 391 und 1901 S. 73 hingewiesen werden.

Bei dem grofsen Umfang der mit Bruch- oder Hochofenschlackensteinen befestigten Uferstrecken (gegen 120 km Canallänge) und infolge der erst 1896 getroffenen Entscheidung über die Befestigungsart mufste die Fertigstellung dieser Arbeiten beschleunigt und daher in gröfseren Losen, die über die Streckengrenzen hinausgingen, theilweise freihändig vergeben werden. Von besonderem Vortheil war es dabei, dafs der Steinbedarf den schon für den Bau der nahegelegenen Schleusen von der Bauverwaltung angekauften Steinbrüchen des Huckberges am Teutoburger Wald entnommen werden und die Heranschaffung zu Wasser auf dem theilweise gefüllten Canal oder unter Benutzung der noch vorhandenen Erdarbeitsgleise erfolgen konnte.

Die Kosten haben da, wo die Bruchsteine aus den Brüchen an der unteren Ruhr oder bei Ibbenbüren angekauft werden mufsten, in ungünstigen Fällen einschliefslich besonderer Fufssicherungen bis zu 16,30 ℳ für 1 m Uferlänge, im allgemeinen jedoch nur 11 ℳ betragen und verminderten sich auf den Strecken, wo der Steinbedarf aus den fiscalischen Brüchen entnommen wurde, auf 8,50 bis 6,60 ℳ. Die Befestigung mit Cementplatten hat nach dem normalen Querschnitt durchschnittlich 2,90 ℳ für das qm (6,60 bis 9 ℳ für 1 m Uferlänge) gekostet, während für die Platten mit Eiseneinlagen 5,40 ℳ für 1 qm oder 13 ℳ für 1 m Uferlänge gezahlt werden mufsten. Stampfbeton mit Erdankern nach Möllers Patent stellte sich auf 3 ℳ für das qm. Nach dieser Bauweise sind im ganzen 2100 qm auf rund 600 m Uferlänge hergestellt; einfache Platten sind auf etwa 35 km, Platten mit Eiseneinlage auf 7,5 km Uferlänge verlegt. Die normale Befestigung in den Umgehungscanälen der Ems mit Steinbewurf auf Rasen und mit Pflanzenwuchs stellte sich auf 2,85 ℳ für 1 m Uferlänge. Wo sich die Berme nach Füllung des Canals abbrüchig zeigte, ist es nachträglich mit Rohr, Calmus oder Weiden stellenweise auch mit Spreutlage oder Schotter, zum Theil auch mit Schlacken bedeckt (Text-Abb. 39). Die Kosten der in zwei Reihen mit 1 m Längsabstand vorgenommenen Bepflanzung betrugen 8 bis 17 Pfennig für 1 m Uferlänge.

Ueber die Zweckmäfsigkeit und die bisherige Bewährung der Uferdeckungen ist zu bemerken, dafs sich die Bruch- oder Schlackensteinpackung bei gehöriger Unterbettung wohl am besten bewährt. Auch lassen sich dabei leicht Ausbesserungen vornehmen. Wichtig ist besonders die Sicherung des Fufses und die Verhütung der Sandausspülung durch eine gute Schotterunterlage. Ebenso haben sich die Befestigungen auf den Schleusencanälen der Ems (Rasen, Schotterdecke und Anpflanzungen) bisher sehr gut gehalten. Schilfpflanzungen allein scheinen für regen Dampferverkehr unzulänglich zu sein; auch besteht die Gefahr, falls sie im Herbst oder vom Eise aus nicht unter Wasser geschnitten



Abb. 39. Befestigung durch Bepflanzung. 1 : 400.

werden, dafs sie bei Eisaufbruch und steigendem Wasser leicht ausgerissen werden. Im ganzen hat sich bisher auch die Deckung mit Cementplatten oder Stampfbeton gut gehalten, besonders auf fester Unterlage, wie beispielsweise Lehmboden, oder bei Unterstopfung mit Kohlenasche. Im feinen Sandboden werden die Platten jedoch durch die Fugen leicht hohl gespült und versacken oder brechen dann. Die Bauart aus einzelnen Platten ist im allgemeinen einer zusammenhängenden Cementdecke vorzuziehen, da sie leichter zu unterhalten ist und die Herstellung der Platten in der Fabrik meist auch gediegenere Ausführung gewährleistet. Eisen- oder Drahteinlagen haben sich nicht als nothwendig, aber bei grofsen Platten als erwünscht erwiesen; Erdanker erscheinen dabei entbehrlich.

Bei den Anschlüssen an die Bauwerke und in den Liegeplätzen und Häfen sind grundsätzlich keine Cementplatten, sondern nur Steinpflaster auf Schotter oder unter Wasser Beton verwandt. Die Befestigung ist bis zur Sohle durchgeführt, die Berme läuft aus, und die Neigung geht in $1:1^1/_4$ bis 1 : 1 am Bauwerk über. Die unter den Brücken mit 1 : 1 oder steiler bis 1 : 0,2 angelegte Böschung, deren Befestigung bis zur Sohle reicht, ist unter Festhaltung der durchgehenden Böschungslinie in 1,50 m Tiefe auf die Länge der Uebergangskrümmungen in den Normalquerschnitt und die normale Befestigung übergeführt (Text-Abb. 40). Der Uebergang erfolgt allmählich, indem die Unterwasserberme ausläuft. Die Befestigung besteht entweder aus Trockenmauerwerk mit oder ohne Schotterbettung und gesichertem Fufs, oder bei steilerer Neigung als 1 : 1 aus einer durch

Bruchsteinpflaster in Cementmörtel bekleideten Betonwand (Text-Abb. 41 bis 44). Bei ganz steiler Neigung geht sie in eine vollständige Betonmauer mit Spundwand und Betonbettung über (Text-Abb. 45 und 46).

Auf der Strecke Oldersum — Emden, wo im Anschlufs an den freien Emsstrom auf einen mechanischen Schiffszug vom Ufer aus nicht gerechnet ist, ist der hier nur 1 m breite Leinpfad im Anschlufs an den Brückenpfeiler auf der durchgehenden hohen Pfahlrostgründung in Mauerwerk aufgeführt. Die Böschungen der freien Strecke gehen vor diesen Pfeilern bis zur Höhe von 0,50 m unter dem Wasserspiegel unverändert durch, darüber laufen sie gegen die Böschungskegel der Rampen aus, deren Fufs durch eine in Höhe des Niedrigwassers stehende Pfahlwand und Steinbekleidung gesichert ist. Der Uebergang des Treidelpfades wird durch einen 9 m langen schrägliegenden Holzsteg vermittelt. Im Ebbe- und Fluthgebiet bestehen die Uferbefestigungen in den Einbuchtungen unter Niedrigwasser aus dreifachen Sinkstücklagen, deren vordere Abtreppung in der Neigung 1 : 2 mit Steinschüttung abgedeckt ist; in den Ausbuchtungen aus Buhnen. Innerhalb des Fluthwechsels erfolgt die Deckung durch Rasen mit 15 cm starker Steinschüttung. In den Durchstichen zwischen Herbrum und Papenburg ist die mit 1 : 3 angelegte Unterwasserböschung in den Einbuchtungen nach Text-Abb. 21 S. 265 durch Buschmatratzen mit Steinbelastung geschützt.

Die Gesamtlänge der zu befestigenden Ufer ausschliefslich Oldersum — Emden beträgt 465 km; davon entfallen in abgerundeten Zahlen

auf die Bauwerke mit ihren Anschlüssen und die Befestigung unter den Brücken etwa . . .	26 km
auf die unbefestigt gebliebenen Strecken und die Rasen- usw. Anpflanzungen bis Meppen etwa	60 „
auf Strecken mit Bruch- oder Schlackensteinbefestigung	224 „
auf Strecken mit Cementplatten	43 „
auf die Emsstrecken zwischen Meppen und Papenburg	112 „
zus.	465 km.

Die Gesamtkosten belaufen sich einschliefslich der Uferbefestigungen an den Bach- und Flufsläufen im Anschlufs

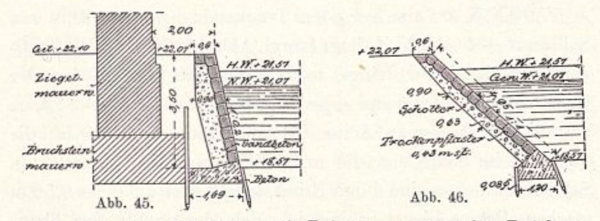


Abb. 45 u. 46. Befestigung mit Betonmauer unter den Brücken.

an die Canalbrücken, Düker und Durchlässe usw. auf 5 500 000 ℳ; hiervon entfallen auf die Strecke unterhalb Meppens 633 000 ℳ und auf Oldersum — Emden 24 000 ℳ, sodafs sich für die 176,2 km lange künstlich hergestellte Strecke bis Meppen die kilometrischen Durchschnittskosten einschliefslich der besonderen Deckungen im Anschlufs an die Bauwerke und in den kleineren Häfen auf 4 843 000 : 176,2 = rund 27 500 ℳ stellen. Die höchsten Kosten entstanden auf der Strecke Senden mit 46 200 ℳ für 1 km Canallänge, die niedrigsten auf der Strecke Varloh im alten Emscanal mit

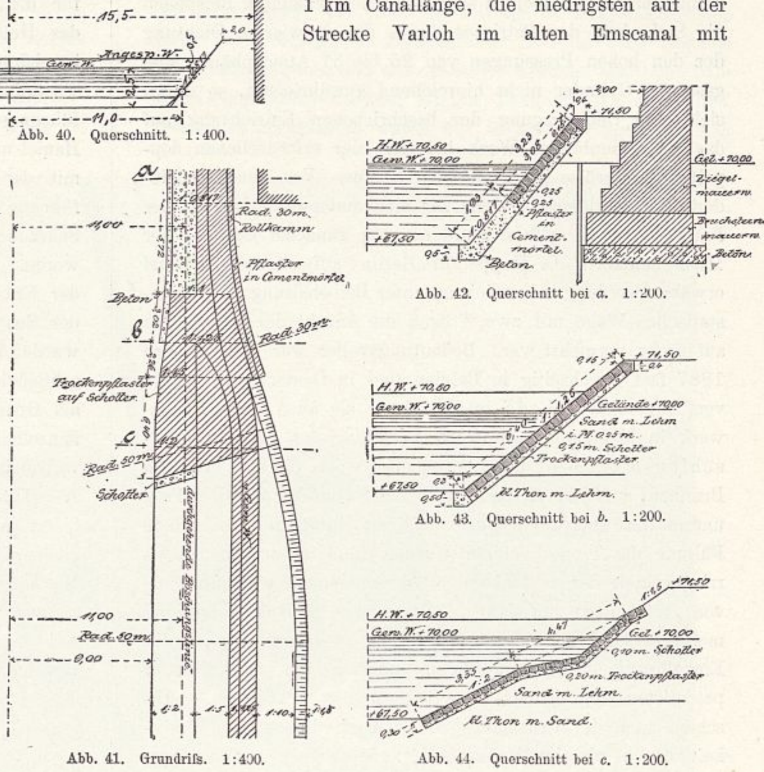


Abb. 40 bis 44. Befestigung des Ufers unter und an den Brücken.

13 400 ℳ. Zwischen Meppen und Papenburg betragen die Kosten der Uferdeckungen rund 10 300 ℳ für das km ausgebaute Emsstrecke.

IV. Bauwerke.

A. Das Schiffshebewerk bei Henrichenburg in Kil. 15,28.

Wie im Abschnitt II, A unter a) angeführt ist, war schon bei Feststellung der Canallinie wegen der Schwierigkeit der Wasserbeschaffung für die Dortmunder Haltung angenommen, an Stelle der ursprünglich geplanten Schleusentreppe das bis zur Haupthaltung 14 m betragende Gefälle von + 70,00 bis 56,00 N.N. an einer Stelle zusammenzufassen und durch ein Schiffshebewerk zu überwinden. Aufser der Wasserersparnifs bot eine derartige Anlage auch den Vortheil einer wesentlichen Zeitabkürzung für den Schiffahrtsverkehr. Das gegebene Gefälle wies auf die Wahl eines senkrechten Hebewerkes, und zwar einer sogenannten Schwimmerschleuse hin, für welches in dem unterliegenden Kreidemergel ein besonders günstiger Baugrund vorhanden war.

Die neueren bisher nur im Auslande errichteten Hebewerke dienen zur Beförderung von Schiffen bei Anderton in England von 100 t, bei Fontinettes in Frankreich von 300 t und bei La Louvière in Belgien von 350 t Tragfähigkeit. Die Hubhöhe beträgt dabei der Reihe nach 15,35, 13,13

und 15,40 m, ist also im wesentlichen dieselbe wie bei Henrichenburg. Die Einrichtung ist derart, dafs je zwei neben einander angeordnete Tröge im Schwerpunkt durch je einen Kolben unterstützt sind. Die Kolben bewegen sich in Druckwassercylindern auf und ab, die durch eine Rohrleitung verbunden sind. Erschien schon bei den genannten Beispielen die Sicherheit des Betriebes durch die schwierige Dichtung der den hohen Pressungen von 25 bis 37 Atmosphären ausgesetzten Cylinder nicht hinreichend gewährleistet, so stellte sich eine Uebertragung der beschriebenen Einrichtung auf das Henrichenburger Werk bei der hier erforderlichen doppelten Troggröfse als bedenklich heraus. Von den verschiedenen Vorschlägen, welche für eine anderweite Lösung der Frage ins Auge gefafst wurden, mag zunächst der von der Maschinenfabrik C. Hoppe in Berlin aufgestellte Entwurf erwähnt werden, bei welchem unter Beibehaltung der hydrostatischen Wage mit zwei Trögen die Anzahl der Prefskolben auf sechs vermehrt war. Bedeutungsvoller war der im Jahre 1887 fast gleichzeitig in Belgien und in Deutschland sowohl vom Ingenieur Jebens in Ratzeburg als auch vom Grusonwerk in Magdeburg gemachte Vorschlag der Schwimmerschleuse mit einem Schleusentrog, wobei ein sich in einem Brunnen auf und ab bewegender Schwimmkörper den Trog unterstützt und die bewegende Kraft durch die wechselnde Füllung des Troges gebildet wurde. Eine wesentliche Förderung erhielt der Gedanke der Schwimmerschleuse durch die von Prüsmann im Jahre 1890 vorgeschlagene Anordnung mehrerer Schwimmkörper in Gestalt stehender Cylinder in Einzelbrunnen in Verbindung mit eigenartigen, dem Erfinder patentirten Regulirungs- und Steuerungsvorrichtungen.*) Erschien auch der Prüsmannsche Entwurf, dessen Ausführbarkeit durch ein im Mafsstabe 1:15 hergestelltes betriebsfähiges Modell erprobt wurde, für die örtlichen Verhältnisse bei Henrichenburg nicht ungeeignet, so blieben doch gewisse Bedenken, besonders in Bezug auf die Betriebssicherheit bestehen. Diese sowie andere Erwägungen, namentlich auch die Schwierigkeit, über die maschinen- und schiffbautechnischen Einzelheiten ein sicheres Urtheil zu gewinnen, führten dazu, vor der endgültigen Entscheidung unter mehreren geeigneten Maschinen- und Hüttenwerken eine engere Ausschreibung zur Erlangung von Entwürfen zu veranstalten. Um dabei auch neuen Gedanken Spielraum zu gewähren, war die Wahl der Bauart d. h. senkrechtes Hebewerk oder geneigte Ebene völlig freigestellt. Die Abmessungen des Schleusentroges waren auf 68 m nutzbare Länge, 8,60 m Breite und 2,50 m Wassertiefe festgesetzt. Im übrigen waren Betriebssicherheit und sparsamer Wasserverbrauch bei möglichst geringer Hubdauer vorgeschrieben. Demzufolge wurden im Frühjahr 1893 von der Gutehoffnungshütte in Sterkrade, C. Hoppe in Berlin, E. Berninghaus in Duisburg in Verbindung mit A. Riedinger in Augsburg, ferner von Haniel und Lueg in Düsseldorf und endlich von dem Kruppschen Grusonwerk in Magdeburg in Verbindung mit der Dortmunder Union im ganzen zehn Entwürfe vorgelegt. Unter diesen befanden sich acht senkrechte Hebewerke, darunter fünf als Schwimmerschleusen, zwei mit hydraulischen Prefskolben und einer mit Gegengewichten an Wagebalken, aufserdem zwei geneigte Ebenen mit Prefsluft- und elektrischem Antrieb.

*) Ueber die Schwimmerschleuse von Jebens s. Deutsche Bauzeitung 1890, S. 145, vom Grusonwerk: Glasers Annalen 1888, Heft 2 u. 3, von Prüsmann: „Le Génie civil“ 1892, S. 117.

Die eingehende Prüfung der Entwürfe fiel unter Berücksichtigung eines auch von der Akademie des Bauwesens erstatteten Gutachtens dahin aus, dafs zunächst allgemein für die vorliegenden örtlichen Verhältnisse die Anordnung des Hebewerkes als Schwimmerschleuse als die geeignetste bezeichnet wurde. Ferner wurde von den eingereichten Entwürfen der genannten Art zwar keiner ohne weiteres als ausführungsreif angenommen, dagegen bestimmt, dafs der von Haniel und Lueg aufgestellte Entwurf der Schwimmerschleuse mit der von Jebens schon früher vorgeschlagenen Parallelführung des Troges durch senkrecht stehende drehbare Schraubenspindeln der weiteren Bearbeitung zu Grunde gelegt werde. Nachdem ferner festgestellt war, dafs die Ausführung der Erd- und Maurerarbeiten, mit Ausnahme der Abteufung der Schwimmerbrunnen, anderweit verdungen werden sollte, wurde die Ausführung der sämtlichen übrigen Theile einschliefslich der Betriebsmaschinen usw. an Haniel und Lueg als Generalunternehmer übertragen, wobei alle wichtigeren Einzelheiten der weiteren Bestimmung der Bauverwaltung vorbehalten blieben.

Das im Atlas auf Blatt 28 bis 34 dargestellte Werk bietet in seiner Gesamtanlage eine derartige Fülle neuer und eigenartiger Einzelheiten vornehmlich auf dem Gebiete des Maschinen- und Eisenbaues, dafs ein näheres Eingehen hier zu weit führen würde; die nachstehende kurze Darstellung soll daher lediglich vom Standpunkte des Wasserbau- und Betriebstechnikers ausgehen.*)

a) Tragende Theile.

Die mittlere Höhe des Geländes an der Baustelle liegt auf + 62,50 N.N.; bis auf etwa 2,5 m Tiefe fanden sich wechselnde Schichten von Sand und Thon, in dem das Grundwasser 1,5 m unter der Oberfläche lag, alsdann folgen bis + 20,00 N.N. Mergelschichten, zunächst auf etwa 10 m blauer Geschiebemergel, darunter fester Kreidemergel (vgl. Abschnitt II, B). Der um 0,5 m angespannte Wasserstand der Dortmunder Haltung liegt auf + 70,50, der Normalspiegel der Haupthaltung auf + 56,00 N.N., die Hubhöhe beträgt also unter gewöhnlichen Verhältnissen bis zu 14,5 m. Für ausnahmsweise eintretende gröfsere Unterschiede (von + 71,00 in der Dortmunder Haltung bis + 55,00 N.N. in der Haupthaltung) ist jedoch das Hebewerk auf eine Hubhöhe bis zu 16 m eingerichtet. Damit der Schleusentrog auch in der tiefsten Lage im Anschlufs an das Unterwasser nicht in dieses eintaucht, ist von der für das Unterhaupt mafsgebenden Plattformhöhe + 57,00 N.N. aus eine besondere Trogkammer hergestellt, deren Sohle auf + 50,15 N.N. liegt (vergl. Abb. 11 Bl. 33). Die Trogkammer wird ihrer Länge nach durch die Unterbauten der Canalhäupter und vier steinerne Eckthürme begrenzt. Ihre Länge beträgt von Achse zu Achse Thurm gemessen 72,16 m; die 13 m breite Sohle und die mit der Neigung 1 : $^3/_4$ angelegten Seitenwandungen sind durch Bruchsteinpflaster auf einer 0,50 m starken Betonschicht bekleidet. Von der Sohle der Trogkammer sind fünf Brunnen von 9,20 m lichtem Durchmesser

*) Eine Beschreibung des Hebewerkes mit besonderer Berücksichtigung der Maschineneinrichtung findet sich in der „Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure“, 1899, Nr. 32; s. aufserdem Centralblatt der Bauverwaltung, 1895, S. 509 und 1896, S. 308.

und 14,50 m Achsabstand abgeteuft, die bis oben mit Wasser gefüllt zur Aufnahme der den Schleusentrog tragenden Schwimmer dienen; sie mufsten der Hubhöhe entsprechend, damit die Schwimmer auch in ihrer höchsten Lage unter Wasser bleiben, bis auf + 22,50 N.N. hinabgeführt werden. Die Brunnenwandungen sind auf den oberen 3 m mit einem 0,77 m starken Betonring bekleidet, der in der Form seines oberen Abschlusses am leichtesten dem für die Querverbindungen unter dem Schleusentrog bei dessen tiefster Stellung erforderlichen Raum angepafst werden konnte; der übrige Theil ist mit den aus dem Bergbau bekannten sog. Tübbings, d. s. gufseiserne Rippenplatten, ausgekleidet, deren Höhe im einzelnen 1,50 m beträgt und von denen 16 Stücke auf einen Ring kommen. Ihre Abmessungen sind aus Abb. 2 Bl. 33 ersichtlich. Die unter der Betonschicht und in halber Tiefe eingebauten tiefer eingreifenden Ringe dienten zum Tragen der von oben nach unten mit dem Ausbruch des Gebirges fortschreitend eingebauten Tübbings während der Bauausführung. Die einzelnen Ringe sind mit Cementmörtel hintergossen und unter sich durch Bleieinlagen gedichtet (Abb. 3 Bl. 33). Diese den Bodenverhältnissen angepafste Auskleidung gestattete nicht allein eine beschleunigte Ausführung, sondern empfahl sich einer Ausmauerung gegenüber auch durch gröfsere Zuverlässigkeit und Sicherheit und geringere Kosten. Die Sohlen der Schächte sind als Abschnitte von Hohlkugeln durch eine Betonschicht von 0,80 m Stärke hergestellt. Alle fünf Brunnen sind gleichzeitig abgeteuft, sodafs einseitige Druckbeanspruchungen der Zwischenwände vermieden wurden. Der Bauvorgang, bei dem das Gebirge in Kippwagenkasten durch zwei bewegliche Dampfkrahne auf die oben liegende Förderbahn gehoben und mit denselben Krahnen sämtliche Bautheile eingebracht wurden, ist aus Text-Abb. 47 ersichtlich. Wasserhaltungsarbeiten waren nur in sehr geringem Umfang erforderlich. Die Brunnen sind unter einander durch 0,12 m weite Rohre in der Tiefe des Scheitels der Sohlengewölbe verbunden, um in allen Brunnen eine Ausspiegelung des Wasserstandes ständig herbeizuführen, und um beim Entleeren zum Zwecke von Ausbesserungen mit einer Pumpanlage das Wasser in allen Brunnen möglichst gleichmäfsig abzusenken und dadurch ungleiche Druckbeanspruchungen des Gebirges zu vermeiden. Der Wasserstand der Brunnen wird während des Betriebes durch am Unterhaupt angeordnete Pumpen geregelt.

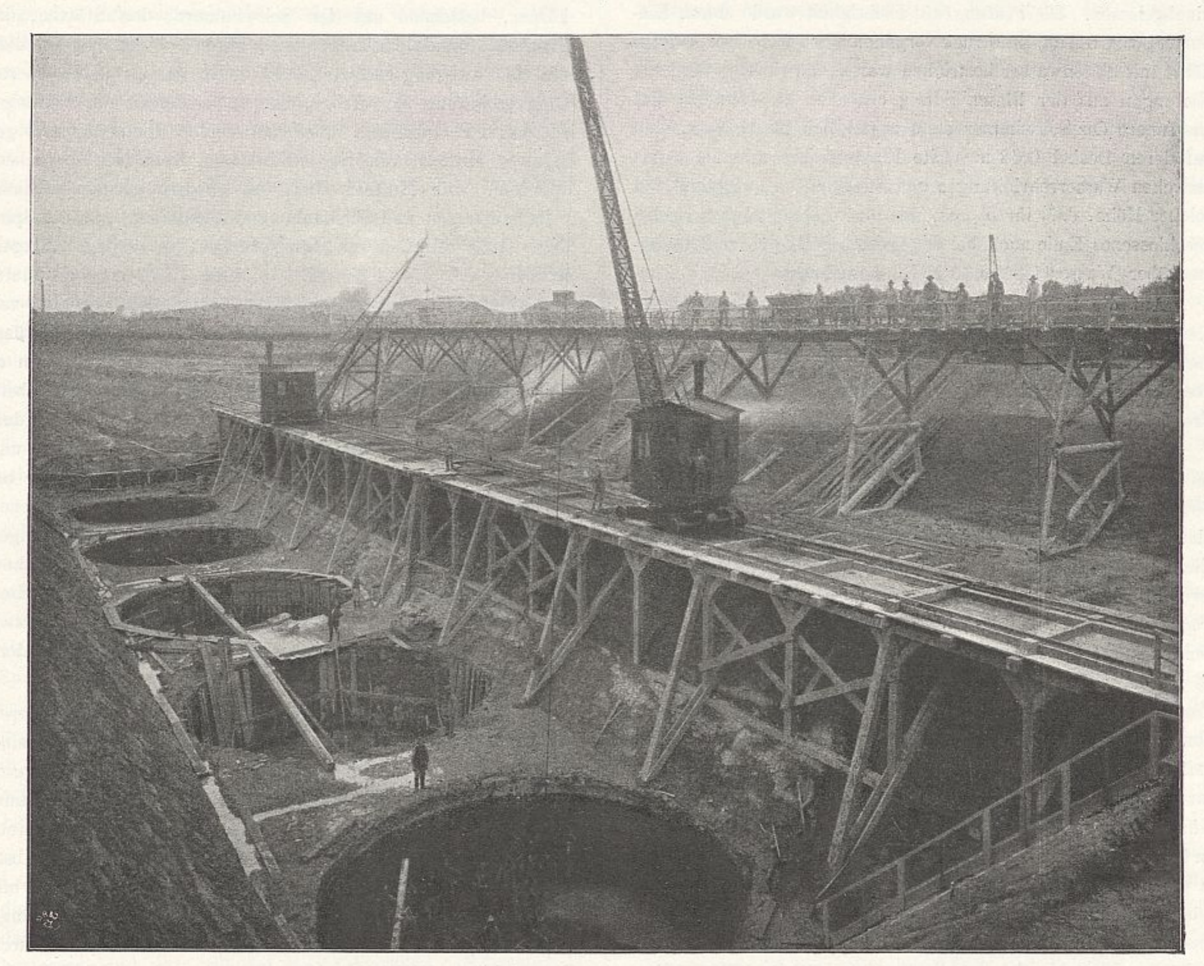


Abb. 47. Baugrube des Schiffshebewerkes während der Ausführung der Schwimmerbrunnen.
Bauzustand am 5. September 1894.

Das durch die Schwimmer zu hebende Gesamtgewicht beträgt gegen 3000 t, wovon 1550 t auf das Wassergewicht im Troge, 800 t auf das Eisengewicht des Troges und der Tragstützen und 600 t auf das Eisengewicht der Schwimmer

kommen. Letztere sind cylindrisch geformte Hohlkörper von 8,30 m äufserem Durchmesser und 10,30 m Höhe. Boden und Deckel haben die Gestalt einer Kugelhaube. Jeder Schwimmer verdrängt 620 cbm Wasser, der Auftrieb sämtlicher fünf Schwimmer entspricht daher der angegebenen Gesamtlast. In Bezug auf die Bauart der Schwimmer ist auf die ausführliche Beschreibung im Centralblatt der Bauverwaltung 1896 S. 308 zu verweisen. Die Schwimmkörper sind auf Gerüsten über den Brunnen montirt und dann nach erfolgter Druckprobe mit Schraubenspindeln in die Brunnen hinabgelassen. Die Prüfung auf Dichtigkeit wurde durch Einpumpen von 3 Atm. Luftdruck vorgenommen, wobei die Aufsennähte mit Seifenwasser bestrichen waren, um etwaige undichte Nietungen aus der Blasenbildung erkennen zu können. Um das Innere der Schwimmer stets zugänglich zu machen, sind auf deren Deckel 0,68 m weite Einsteigrohre mit den erforderlichen Wasserrohrleitungen und Steigeleitern aufgesetzt von solcher Höhe, dafs ihr oberes, mit einem abnehmbaren Deckel geschlossenes Ende auch bei der tiefsten Stellung der Schwimmer über Wasser (+ 50,30 N.N.) herausragt.

Auf die Schwimmer setzen sich eiserne Gerüstpfeiler von rund 17,90 m Höhe auf, die oben in 4,60 m von einander entfernte Querträger aus Gitterwerk endigen, auf deren überstehenden Enden sich die beiden Hauptträger der sog. Trogbrücke aufsetzen (Abb. 1 Bl. 30 u. 31 und Abb. 1 Bl. 33).

Der Schleusentrog selbst ist ein aus oben offenen Rahmen als Querträgern bestehender Eisenkasten mit Seitenwänden aus 10 bis 14 mm starkem Eisenblech und mit 8 mm dicken Buckelplatten im Boden, der gegen Schiefstellen oder Verbiegungen allein nicht genügend widerstandsfähig erschien und daher in zwei kräftige, aus zweitheiligem Netzwerk gebildete Parallelträger von 9,30 m Höhe und 11 m Achsabstand eingehängt worden ist. (Vgl. Abb. 1 Bl. 30 u. 31 und Abb. 1 bis 5 Bl. 34.) Es ist dadurch Raum vorhanden, neben der Wasserfläche des Troges noch jederseits 0,70 m breite Laufstege für die Bedienungsmannschaften auf die Trogquerträger aufzusetzen und über und unter dem Trog die erforderlichen starken Querverbindungen anzubringen. Der Trogkörper ist nur mit dem einen Querrahmen, und zwar mit dem oberhalb liegenden fest verbunden, im übrigen greifen die Querträger des Troges mit Stahlgufszapfen in die untere Querverbindung der Träger derart ein, dafs eine Längsausdehnung der Träger unabhängig vom Trog nicht behindert ist. Im Abstand von 3 × 14,50 = 43,50 m erheben sich von der Sohle der Trogkammer zwei starke, 29 m hohe, oben durch Quer- und Längsrahmen verbundene Fachwerkgerüste, an welchen die Führungs- und Bewegungsvorrichtungen angreifen. Diese Führungsgerüste nehmen zunächst etwaige seitliche Schwankungen durch Vermittlung der Hauptträger auf. Ebenso werden seitliche Stöfse und Winddruck durch die beiderseits verlängerten unteren Querriegel der beiden Hauptrahmen aufgenommen und auf die Gleitbahnen der Führungsgerüste übertragen. Kräfte und Stöfse in der Längsrichtung werden dagegen nur durch das dem Oberhaupt zunächst liegende Führungsgerüst vermittelst des zugehörigen Querriegels und der Gleitbahnen aufgenommen. Indem das Führungsgerüst am Oberhaupt mit dem Mauerwerk desselben etwa in Höhe der oberen Canalsohle beiderseits verankert ist, ist es ermöglicht, beide Führungsgerüste fest anzuordnen, während die Trogbrücke sich ungehindert ausdehnen kann. Die feste Verbindung des Troges mit dem Querrahmen ist im übrigen so stark, dafs auch die bei Anschlufs des Troges an die obere oder untere Haltung entstehenden Längskräfte, besonders der Spaltwasserdruck und der Druck auf das Trogthor von zusammen etwa 66 t und der noch zu erörternde Schub des Dichtungsschlusses auf das oberhalb liegende Führungsgerüst übertragen werden.

b) Zur Bewegung dienende Theile.

Der ganze im labilen Gleichgewicht befindliche Schleusenkörper, bestehend aus den Schwimmern, den Stützen, der Trogbrücke und dem Troge, wird gegen Schiefstellen gehalten und in Bewegung gesetzt durch die in der Ebene der oberen Querverbindung der Trogbrücke in beiderseitigen Verlängerungen der Querriegel über den beiden Hauptständern gelagerten Muttern von vier senkrechten drehbaren Schraubenspindeln. Die Muttern sind, um gewisse geringe seitliche Verschiebungen und Schwankungen zuzulassen und die Spindeln stets centrisch zu beanspruchen, beweglich gelagert worden (Abb. 9 und 10 Bl. 33). Der 1,502 m hohe Flufsstahlkörper mit den zweitheiligen Muttergewindeschalen von 1,20 m Länge wird an den Gleitbahnen der Führungsgerüste mit je 4 mm Spielraum in der Längsrichtung und 3 mm in der Querrichtung geführt; er wird durch vier starke Schraubenbolzen mit zwei Flufsstahldeckeln derart umschlossen, dafs die verlängerten Querriegel mit ihren 1,50 m hohen und zweimal 60 mm starken Stehblechen nach der Seite frei beweglich dazwischen greifen, während die Mutter zwischen den Stehblechen 30 mm Spielraum für die Wärmeausdehnungen der Trogträger hat. Es kann daher stets nur ein senkrechter Druck übertragen werden, der gleichmäfsig zu beiden Seiten der Schraubenspindel wirkt und nicht imstande ist, etwa elastische Verbiegungen der Querriegel den Schraubenspindeln mitzutheilen.

Die Schraubenspindeln selbst hängen in dem am oberen Querträger der Führungsgerüste befestigten Halslager; sie sind aus einem einzigen Martin-Siemens-Flufsstahlblock durch hydraulische Pressung hergestellt. Sie haben eine Gesamtlänge von 24,60 m bei 245 mm Kern- und 280 mm äufserem Durchmesser; das doppelt geschnittene, rechteckige selbstsperrende Gewinde von $^1/_8$ Steigung ist 17 m lang mit beiderseitigem Auslauf von 0,25 m. Auf ihre ganze Länge sind die Spindeln mit 100 mm Kern durchbohrt, um dadurch den nöthigen Aufschlufs über die innere Beschaffenheit des Materials zu erhalten. Am unteren Ende der Spindeln befindet sich gleichfalls ein Halslager, das mittels eines kastenförmigen Ständers im festen Mergelfels durch 11 m tief eingreifende Anker gehalten wird (Abb. 12 Bl. 33). Die Halslager werden durch schwere stählerne Keile mit dem Eisenwerk verbunden. Die Führungsgerüste selbst sind den örtlichen Verhältnissen in ihrer Form zweckmäfsig angepafst und in Nischen der Trogkammer aufgestellt und gleichfalls verankert. Da die mit einer Kugellagerung angestellten Modellversuche ungünstig ausfielen, sind zur Aufnahme der Betriebsbeanspruchungen der Schraubenspindeln zwischen den auf den Enden sitzenden Muttern und den festen Halslagern Ringlager eingefügt, bei denen Flufsstahl auf Phosphorbronce gleitet; am oberen Ende sind mit dem beweglichen Theil des Ringlagers die Kegelräder für den Wellenantrieb verbunden (Abb. 5 bis 7 Bl. 33).

Das Eigengewicht einer Spindel beläuft sich auf etwa 9 t. Um die beiden Endlager bei Wärme-Längenänderungen der Spindeln in ständiger Verspannung gegen einander zu halten, ist zwischen dem Flufsstahlkörper des Halslagers und der Gleitfläche noch ein Druckwasserringlager eingeschaltet, dessen Druckwasser durch eine im Spindelmotorraum auf der oberen Plattform aufgestellte, von Hand zu bedienende Kraftwasserpresse mit Windkessel erzeugt wird. Diese Einrichtung erschien erwünscht, um für ungleichmäfsige Ausdehnung der Führungsgerüste und der gegen die Sonnenstrahlen geschützt liegenden Schraubenspindeln genügende Vorsorge zu treffen und die Spindeln von allen inneren Spannungen möglichst zu entlasten. Doch hätte auch die dem Frost ausgesetzte hydraulische Lagerung fortbleiben können, falls die jetzt durch Splinte festgestellten Endmuttern der Spindeln zur Regelung bei ungleichmäfsiger Erwärmung eingerichtet wären; eine derartige Vorrichtung überhaupt ist, wie der Betrieb gelehrt hat, von grofser Wichtigkeit. Um seitliches Schlagen der in Drehung befindlichen Spindeln möglichst zu verhindern, sind vier Stück gleichfalls in den Gleitbahnen der Führungsgerüste bewegliche Führungslager angeordnet, die zu je zweien derartig verbunden sind, dafs die auf- oder niedergehende Trogmutter je zwei über oder unter sich zusammenschiebt, während die beiden anderen dann in den entsprechenden Stellungen, in denen sie die freie Länge der Spindel in drei etwa gleiche Theile zerlegen, festgehalten werden. Diese Zwischenhalslager haben sich jedoch im Betriebe als wohl entbehrlich erwiesen.

Die vier Führungsgerüste sind in einer solchen Höhe durch Quer- und Längsträger, die ihrerseits wieder einen mittleren Querträger tragen, verbunden, dafs der Trog noch in seiner höchsten Stellung darunter Platz findet. Auf dieser oberen Plattform sind der Betriebsmotor für die Spindeln und die Wellenleitungen für den gleichmäfsigen Antrieb der Spindeln gelagert (Abb. 1 u. 2 Bl. 30 u. 31). Der Zugang erfolgt durch einen Laufsteg von der noch 1,60 m höher liegenden Motorbrücke zwischen den Oberhauptthürmen aus, in deren Innerem Wendeltreppen von der untern Plattform neben der Kammer + 57,00 bis zu jener Höhe + 81,40 N. N. hinaufführen.

Die Gesamtanordnung der Spindeln mit ihren Muttern, Lagern, Führungsgerüsten und Verankerungen ist ebenso wie die Bauart der Trogbrücke mit der Bestimmung getroffen, dafs diese Theile — jeder an seiner Stelle — stark genug bemessen sind, um alle bei Betriebsunfällen möglicherweise vorkommenden Inanspruchnahmen mit Sicherheit aushalten zu können. Dahin gehört vor allem der Fall, dafs die Schwimmer infolge unbeabsichtigten Entleerens des Schleusentroges hochzuschwimmen streben oder dafs der Trog infolge Leckwerdens eines oder aller Schwimmer niederzugehen droht. Dann verhindern die Schraubenspindeln zunächst selbstthätig die Weiterbewegung und sind imstande, schliefslich den Auftrieb der Schwimmer, gleich der fehlenden Wasserlast von etwa 1550 t, oder die Last des Troges mit seinen Theilen, also bis zu rd. 3000 t, allein zu halten.

c) Abschlüsse zwischen den Canalhaltungen und dem Troge.

Für die Anordnung der Abschlüsse der Canalhaltungen, der Dichtungen zwischen Trog und Canalhäuptern, sowie der Endabschlüsse des Troges ergab die Forderung, an die Haltungen so genau anzufahren, dafs dadurch allein der Wasserstand im Troge regulirt werden sollte, grofse Schwierigkeiten, die noch durch die stark wechselnden Wasserstände vermehrt wurden. Schon die durch den Wind erzeugten Schwankungen — bei Henrichenburg besonders im unteren kurzen Vorhafen, wo Aufstauungen durch den sich in den Einschnitten fangenden Südwestwind bis zu 0,14 m beobachtet wurden — sind schwierig auszugleichen und erfordern die ständige Aufmerksamkeit des Betriebsbeamten, der danach die Dichtungsvorkehrungen einzustellen oder für Entlastung des Troges zu sorgen hat. Dadurch sind für den Betrieb nachträgliche Einrichtungen nothwendig geworden, die weiter unten erwähnt werden sollen.

Zwischen den beiden Abschlufsthürmen einer Haltung, die 15,50 m Achsabstand von einander haben, sind als Abschlufs des gemauerten 8,80 m breiten Canalquerschnitts sog. Haltungsschilde eingesetzt und im Mauerwerk entsprechend verankert, d. h. dem Canalquerschnitt entsprechende, oben offene flufseiserne Rahmen von winkelförmigem Querschnitt mit 1 bis 2 m Schenkellänge, die durch dreieckige Querwände ausgesteift und mit einem Gummiwulst gegen das Mauerwerk abgedichtet sind. Der die Canalwandung bildende kurze Schenkel ist über die Flucht des aufgehenden Mauerwerks etwa 0,35 m hinaus verlängert und nimmt hier das Haltungsthor auf. Die Haltungsthore, ebenso wie die Abschlüsse des Schleusentroges sind Hubthore, deren Blechwand an den Querriegeln und Ständern hängt und die durch rückwärts gelegene Rollen geführt werden. Die Dichtung erfolgt bei den Trogthoren durch eine die Blechwand einrahmende Gummileiste, welche sich, den Wasserdruck übertragend, gegen einen mit Messingleiste gepolsterten Flansch legt. Dagegen wird bei den Haltungsthoren der Wasserdruck durch beiderseits neun Stück Walzrollen übertragen, während der Gummistreifen eine mit Wasser gefüllte und mit dem Haltungswasser in Verbindung stehende Rille bildet, die durch den Wasserdruck gegen eine Messingleiste geprefst wird (Abb. 8 Bl. 33). Der Anschlufs des Troges an die Haltungen wird durch sog. Dichtungskeile hergestellt, d. s. oben offene Rahmen von kastenförmigem Querschnitt, welche die Haltungsthore umrahmen und an zwei Schraubenspindeln mit Windevorrichtung beweglich aufgehängt sind, sodafs ihre den Haltungen zugekehrte Fläche auf den Stirnflächen der messingbekleideten Haltungsschilde gleitet. Die entgegengesetzte Fläche ist mit 1 : 13 gegen die lothrechte Ebene geneigt. Die gleichfalls messingumrahmten Endflächen des Schleusentrogkastens, die entsprechend im Längsschnitt parallel geneigt sind, drücken sich in den Endstellungen des Troges keilförmig dagegen. Um beim Anfahren gegen die Haltungen die Dichtungskeile nachgiebiger zu machen, sind in der Aufhängung Federn so angebracht, dafs der Keil am Oberhaupt gegen Aufwärts-, derjenige am Unterhaupt gegen Abwärtsdrücken angeprefst wird. Die beiderseits am Dichtungskeil charnierartig eingeklemmten und daher bequem auswechselbaren Gummiwulste besorgen hier den wasserdichten Schlufs und haben sich bisher im Betrieb sehr gut bewährt. Die eigenartige Befestigung ist in Abb. 4 Bl. 33 dargestellt. Jeder Dichtungskeil kann 0,50 m über und 1,50 m unter die normale Lage gestellt werden; er wird seitlich zwischen

den Thürmen durch Rollen geführt und durch eine Hebelvorrichtung mit Excenterscheiben beiderseits am Thurmmauerwerk gegen die Haltungsschilde geprefst. Die Keildichtungen am Ober- und Unterhaupt sind in den Abb. 6 bis 9 Bl. 34 dargestellt.

Sowohl die Haltungs- wie auch die Trogthore sind gegen Anfahren der Schiffe durch federnd gelagerte Sicherheitsbalken geschützt, welche sich gegen vorspringende Winkeleisen am Haltungsschild bezw. an der Trogseitenwand stützen. Im Trog und bei der unteren Haltung liegen sie auf Consolen am Thor auf und werden mitgehoben, wogegen die besonders kräftigen Balken der oberen Haltung für sich aufgehängt und so mit den Drahtseilen der Oberthorgegengewichte verbunden sind, dafs sie sich beim Heben des Thores abwärts ins Wasser senken und in einen Schlitz in der Sohle des Oberhauptes hineinlegen. Die Haltungsthore sind mit Laufbrücken ausgerüstet. Sämtlichen Thoren wird durch Gegengewichte, die an federnd befestigten patentgesplifsten Drahtseilen hängen und mit selbstthätig wirkender Fangvorrichtung versehen sind, nahezu das Gleichgewicht gehalten. Bei den Haltungsthoren liegen die Gegengewichte im Innern der Thürme, am Trog bewegen sie sich aufsen neben dem Endständer der Trogbrücke. Die Lage der Führungsrollen auf der Motorbrücke zwischen den Thürmen bezw. über dem oberen Ende der Trogträger ist aus Abb. 1 Bl. 33 ersichtlich. Für den Hub werden Haltungs- und Trogthor durch je zwei Klinkhebel und untere Stützgabeln gekuppelt; auch hierbei mufste auf einen Wasserwechsel bis zu 2 m ständig Rücksicht genommen werden. Die Klinkhaken an den Trogthoren müssen bei verschiedener Anfahrtshöhe jedesmal verstellt werden. Da auf die Einzelheiten hier nicht näher eingegangen werden kann, sei nur noch erwähnt, dafs die Führung der Thore oberhalb der Leinpfad- oder Laufsteghöhe durch die an den Thürmen und der hochliegenden Motorbrücke befestigten Führungsbahnen erfolgt. Diese reichen nur bis 0,35 m über den Leinpfad hinab, um Raum zum Durchführen von Schiffstrossen oder der Treidelleine zu gewähren. Um auch auf diesem führungslosen Stück gegen Ausschlagen beim Hub gesichert zu sein, ist die bereits erwähnte Walzrollenkette angeordnet, welche im geschlossenen Zustand den 0,35 m hohen Schlitz schliefst, beim Heben infolge ihrer als bewegliche Rolle ausgebildeten oberen Aufhängung sich mit halber Geschwindigkeit mit aufwärts bewegt und so eine Führung abgiebt, bis die Thore allein durch die festen Seitenführungen gehalten werden (Abb. 2 Bl. 29). Diese Walzrollen ermöglichen auch, das Haltungsthor unter Wasserdruck mit möglichst verminderter Reibung anheben oder im Nothfall bei durchströmendem Wasser schliefsen zu können. Zum Einlassen des sog. Spaltwassers in den Dichtungskeil nach Anfahren des Troges dienen jalousieförmige Schieber in den Haltungsthoren.

d) Betriebseinrichtungen.

Die sämtlichen zum Betriebe und zur Ausrüstung des Hebewerkes erforderlichen Maschinen, Aufzüge und Pumpen usw. werden von einem elektrischen Kraftwerk aus in Bewegung gesetzt. Das seitlich und in gleicher Höhe mit der unteren Plattform, also auf + 57,00 N. N., erbaute Maschinenhaus (Abb. 2 Bl. 30 u. 31) von im ganzen 750 qm Grundfläche enthält zugleich Werkstätten- und Diensträume. Auch sind in ihm die beiden Kreiselpumpen zur Speisung der Dortmunder Haltung aufgestellt. Das Kesselhaus enthält drei Wasserröhrenkessel, Bauart Hohenzollern, von je 100 qm Heizfläche und 9 Atm. Ueberdruck, sowie Raum für einen vierten Kessel, aufserdem eine Wasserreinigungsanlage für die Kesselspeisung. Im Maschinenraum stehen zwei Dampfdynamomaschinen mit stehenden Verbundmaschinen von je 220 PS effectiver Leistung zur Erzeugung des Gleichstroms von 230 Volt Spannung. Bemerkenswerth ist das Dach des Maschinenhauses, bei welchem statt Wellblech Monierplatten von 4 cm Stärke auf den eisernen Pfetten verwandt sind. Die Abdeckung besteht aus einer doppelten Asphaltpapplage.

Die Bewegung der Schraubenspindeln erfolgt durch einen 150 pferdigen Elektromotor, der auf der oberen Bühne mitten über dem Schleusentrog in einem Schutzhäuschen aufgestellt ist und die Wellenleitung mit 60 Umdrehungen in der Minute antreibt. Die 90 PS-Elektromotoren zum Heben der Thore sind auf besonderen Brücken zwischen den Thürmen gelagert.

Der Stromverbrauch schwankt stark, indem z. B. für den Spindelmotor bei regelmäfsigem Betriebe auf über $^4/_5$ der Bewegung nur 100 bis 300 Ampère, am Anfang und Ende der Bewegung jedoch bis zu 800 Ampère erforderlich sind. Die Hubgeschwindigkeit des Schleusentrogs ergiebt sich, da die Spindeln ungefähr 111 mm Steigung des Gewindes besitzen, zu $60 \times 0,111$ = rund $6^2/_3$ m in der Minute, sodafs die ganze Bewegung etwa $2^1/_2$ Minuten Zeit beansprucht. Die Haltungs- und Trogthore, die zusammen etwa 16,8 + 11 also etwa 28 t wiegen und durch Gegengewichte bis auf 1 t Uebergewicht beim Eintauchen ausgeglichen sind, werden in etwa $^1/_4$ Minute 7 m hoch gehoben. Der Hub wird durch den Elektromotor mittels Schneckenradübersetzung und Triebstockzahnstangen bewirkt. Während der Spindelmotor vom Betriebshäuschen aus, in dem er untergebracht ist, bedient werden mufs, sind die Handräder mit Gliederketten zur Bedienung der Anlafs- und Umkehrwiderstände für die Schützenmotoren neben dem Leinpfad an den Thürmen angebracht und werden von hier aus durch den Schleusenknecht, der auf dem Trog mitfährt, gestellt.

Die Vorgänge bei der Inbetriebsetzung der Motoren und die getroffenen Sicherheitsvorkehrungen sind nun kurz folgende: Zum Ingangsetzen des Spindelmotors wird

a) der Beginn der Ausschaltung der Widerstände von Hand an einem Stellhebel eingeleitet und zwar so, dafs die Bewegung mit gleichmäfsig beschleunigter Geschwindigkeit zunimmt. Dazu ist eine Uebertragung angebracht, die den Ausschalthebel selbstthätig weiterdreht, sobald der Motor zu laufen angefangen hat. Durch Stromunterbrechung wird

b) die Kupplung der Uebertragung dann wieder ausgerückt und der Motor läuft weiter, die Bewegung des Troges bewirkend. Umgekehrt wird

c) die Abstellung des Motors durch allmähliches Wiedereinschalten der Widerstände herbeigeführt, wodurch gleichzeitig die stofsfreie Beendigung der Bewegung bewirkt wird. Sobald der Trog seine entsprechende Stellung am Dichtungskeil, etwa 0,50 m vor der Endstellung erreicht hat, wird durch selbstthätige Unterbrechung eines Nebenstromes mittels verstellbaren Bügels am Trogende eine andere Kupplung zwischen dem Motor und seinen Anlafswiderständen eingerückt, die das Wiedereinschalten bewirkt. Im letzten Augenblick

erhält die Ausschaltkupplung wieder Strom und giebt den Anlafshebel frei. Gleichzeitig kommt ein Elektromagnet, der zugleich auch zur Feststellung des Stellhebels dient, zur Wirkung und reifst den Hebel in die Mittellage. Durch Kurzschliefsen des Motorankers auf einen Widerstand wird eine kräftige Bremsung des Motors hervorgerufen.

Im Bedarfsfalle kann der Motor sowohl durch Wiedereinschalten der Widerstände von Hand als auch plötzlich durch Unterbrechung des Hauptstromes in jedem Augenblicke stillgestellt werden. Die Vorgänge beim Hub der Thore sind im wesentlichen dieselben; nur geschieht die Abstellung der Motoren bei feststehender Hubhöhe durch eine ablaufende Kette selbstthätig; zur beliebigen Abstellung bietet hier die Stellvorrichtung mit Handrad vom Leinpfad aus gleichfalls die Möglichkeit.

Zur Sicherung des Betriebes, insbesondere zur Verhütung unzeitigen Ingangsetzens des Spindelmotors und der Thorschützenmotoren, dienen folgende Vorrichtungen:

a) Durch Verrieglung der Thore wird der Anlafshebel für den Schützenmotor freigegeben, sodafs die Thore geschlossen und verriegelt sein müssen, ehe die Trogbewegung eingeleitet werden kann. Das Festhalten des Anlafshebels geschieht durch zwei Elektromagnete, die zwei Hebel excentrisch gegen eine auf der Achse des Anlafshebels festsitzende eirunde Scheibe pressen.

b) Die Unterbrechung des Hauptstromes während der Trogbewegung ist aufser am Spindelmotor, wie beschrieben, auch vom Ober- und Unterhaupt aus möglich, sodafs bei Erkennung irgend welcher Gefahr oder Unregelmäfsigkeit von drei Stellen aus sofortiger Stillstand herbeigeführt werden kann.

c) Mit dem Höhenzeiger, der die jeweilige Stellung des Troges anzeigt, ist eine Ausschaltvorrichtung derart verbunden, dafs, falls die selbstthätige Abstellung durch die Nebenstromunterbrechung versagen sollte, diese Abstellung in Wirksamkeit tritt, sobald der Zeiger sich seiner Endlage nähert, ohne dafs ein Wiedereinschalten der Widerstände bereits begonnen hat. Es ist also doppelt Sicherung dafür vorhanden, dafs der Trog seine End-Sollstellung nicht überfährt.

d) Die Thorschützenmotoren werden durch magnetische Feststellvorrichtung in Verbindung mit der ersten, von Hand erfolgenden Bewegung des Stellhebels für den Spindelmotor verriegelt, sodafs sie weder während der Bewegung des Troges noch vor Erreichung der zugehörigen richtigen Endstellung angelassen werden können; die Aufhebung der Feststellung besorgt der Trog selbstthätig. Aufserdem sind die Haltungsthore während der Trogbewegung verriegelt.

e) Etwaiges falsches Anfahren aus der Endstellung wird durch die sofortige Unterbrechung des Hauptstromkreises verhindert. Das Anfahren geschieht bis auf 1 cm genau.

f) Zur Ueberwachung der richtigen Trogstellung an den Häuptern ist aufser der durch Uebertragung vom Motor angetriebenen Zeigervorrichtung noch eine Vorrichtung gleichfalls im oberen Motorenhäuschen aufgestellt, die aus einer am Trog befestigten Drahtleitung mit Gegengewicht besteht und durch Einspielen von Marken an vorhandenen Zeigern den Stand des Troges in seinen Endstellungen unmittelbar zu erkennen giebt. Um schliefslich mehr oder weniger dicht gegen den Keil anfahren zu können, ist die Abstellvorrichtung für den elektrischen Strom am Trog ebenfalls verstellbar.

Sobald beim Betrieb der Trog seine richtige Endstellung erreicht hat und die magnetische Feststellung der Schützenmotoren aufgehoben ist, werden zunächst mit der Hand von der Laufbrücke des Haltungsthores aus durch eine Kurbel gleichzeitig dreierlei Bewegungen verrichtet, d. h. das Thor entriegelt, wodurch zugleich der Anlafshebel des Spindelmotors festgelegt wird, ferner der Schieber zur Füllung des Dichtungskeils mit Wasser geöffnet und endlich die Kupplung von Haltungs- und Trogthor hergestellt. Nach Ausspiegelung des Spaltwassers können die Thore gehoben werden. Trog- und Haltungswasserstand müssen sich so genau ausgleichen, dafs für die Abwärtsbewegung stets 2,52 m, für den Hub 2,50 m Wassertiefe im Trog vorhanden sind. Dieser geringe Unterschied dient zum Ausgleich des Auftriebs der miteingetauchten Tragstützen der Trogbrücke, kann aber als eigentliches Betriebswasser nicht angesehen werden, da sich für eine ruhige und schlagfreie Bewegung der Schraubenspindeln möglichst vollständiges Gleichgewicht zwischen Auftrieb und Last als nothwendig herausgestellt hat. Ist das nicht der Fall, so wird durch die dann eintretenden sehr starken Reibungswiderstände in den Spindeln der Betrieb gefährdet, indem die zwangläufigen Wellenleitungen zum Antrieb der Spindeln leicht Verbiegungen ausgesetzt sind. Zu bemerken ist, dafs die ursprüngliche Absicht, die Auf- und Niederbewegung des Troges nur durch sog. Betriebswasser, d. h. durch wechselnde Wasserfüllung zu bewirken, sich nicht hat durchführen lassen. Es ist daher nachträglich am Trog eine auch während der Fahrt benutzbare Wasserauslafsvorrichtung angebracht, durch welche Gleichgewicht hergestellt werden kann, falls etwa durch Wasserschwankungen in den Haltungen die richtige Höhe des Trogwassers überschritten sein sollte. Bei zu tiefem Wasserstand im Trog, der im Betrieb möglichst zu vermeiden gesucht wird, mufs eine Auffüllung von Wasser, die am Oberhaupt durch die dort vorhandene Pumpe, am Unterhaupt durch die Schieberöffnung im Oberhauptthor*) vorgenommen wird, oder eine Senkung des Troges nach entsprechender Einstellung des Dichtungskeiles stattfinden. Es kann somit auch kein Wasser von der unteren Haltung in die obere befördert werden. Theils zur nachträglichen Einstellung des vollständigen Gleichgewichts, theils um den pendelnden Bewegungen der Schwimmer, die erst durch Vermittlung der Tragstützen und der Trogbrücke von den etwa 27 m über dem Deckel liegenden Schraubenmuttern gehalten werden, entgegenzuwirken, sind in jeden Schwimmer 6 t Eisenballast (entsprechend 5 cm Wasserhöhe im Trog) eingebracht worden. Soll der Trog die Endstellung verlassen, so werden nach Schlufs der Thore durch dieselbe Handkurbel von der Laufbrücke aus die Thore entkuppelt, der Schieber im Haltungsthor geschlossen und das letztere verriegelt, sodafs der Stellhebel für den Spindelmotor freigegeben ist. In der oberen Stellung stürzt dann das Spaltwasser, sobald sich der Trog abwärts bewegt, in einen unter seinem Oberhaupt angebrachten Kasten, der mit zwei unter dem Trog entlang laufenden Rohren verbunden ist, welche ihrerseits am Unterhaupt des Troges mit stellbaren Klappen verschlossen sind, und wird nach unten mitgenommen. Nähert sich der Trog hier seiner Endstellung, so öffnen sich die

*) In diesem Falle stürzt das Wasser von oben frei im Bogen in den Schleusentrog.

Klappen durch einen am Trog angebrachten Hebel selbstthätig und das Spaltwasser stürzt in die den Boden der Trogkammer umgebende Rinne ab; hierher gelangt das bei Beginn der Hubbewegung freiwerdende Spaltwasser unmittelbar. Auf diese Weise ist das obere Spaltwasser zur Ueberlast für die Abwärtsbewegung nutzbar gemacht. Das unter dem überwölbten Unterhaupt sich ansammelnde Wasser wird durch am Unterhaupt aufgestellte Pumpen in das Unterwasser befördert.

Zu den weiteren Betriebs- und Sicherheitseinrichtungen gehört aufser vier mit Schneckenradübersetzung angetriebenen Spillen von je 1000 kg Zugkraft, welche zum Ein- und Ausfahren der Schiffe dienen, auch das zum Nothabschlufs des Oberhauptes vorgesehene Sperrschiff; ferner zwei Luftdruckpumpen, die zum Entleeren der Schwimmer von Leckwasser oder von dem im Bedarfsfalle einzulassenden Trogwasser und zu ihrer Entlastung von Wasserdruck dienen, und eine Doppel-Kreiselpumpe, die erforderlichenfalls das Entleeren der Brunnen bewirkt. Zu erwähnen sind aufserdem die Fernsprechanlage zwischen dem Motorhäuschen auf der Plattform, dem Leinpfade an den Haltungsthoren und dem Maschinenhause und die elektrische Beleuchtungsanlage für etwaigen Nachtbetrieb. Auch ist zur sofortigen Beseitigung von Undichtigkeiten und eintreibenden Fremdkörpern in den verschiedenen Dichtungsschlitzen eine Taucherausrüstung vorhanden und ein Beamter als Taucher ausgebildet. Endlich soll demnächst in einem besonderen Gebäude neben dem Maschinenhause eine Accumulatoren-Batterie aufgestellt werden.

Die Zeitdauer einer Doppelschleusung, d. h. die Zeit, in welcher ein Schiff hinauf und ein anderes hinabbefördert werden kann, beträgt nach den vorliegenden Betriebserfahrungen ohne unvorhergesehene Störungen 25 Minuten. Hierbei entfallen allein $4 \times 4^1/_2$ Minuten auf die Ein- bezw. Ausfahrt der Schiffe mit Hülfe der Spille; die übrige Zeit auf die Betriebsvorgänge der Schleusung.

e) Sonstiges und Kosten.

Das Mauerwerk der Canalhäupter und der Thürme ist durchweg aus Stampfbeton mit Verkleidung aus Ruhrkohlensandstein hergestellt; seine Anordnung und Abmessungen sind aus Bl. 32 zu ersehen. Die Thurmbekrönungen am Oberhaupt sind aus Obernkirchener Sandstein, die Kugeln aus Kupferblech mit einem inneren Eisengerüst. Wegen der grofsen Eisenmassen sind alle hohen Punkte, wie die Thürme am Oberhaupt, das Spindelmotorhäuschen und der Schornstein mit Blitzableitern versehen. Zur architektonischen Ausschmückung sind die Flügelmauern im Anschlufs an die Wegeunterführung an dem Oberhaupt durch Gesimse und Nischen reicher gegliedert. Auch sind zu beiden Seiten der oberen Thürme die Wappen der Provinzen Westfalen und Hannover als Flachbilder in Stein gehauen und die beiden Verbindungsbrücken zwischen den Thürmen mit den Häuschen für die Thorschützenmotoren durch Kupferblech und bildnerischen Schmuck in getriebener Arbeit bekleidet. Zur Veranschaulichung der Gesamtanlage dienen die Abbildungen auf Bl. 28 und 29. Aus diesen ist auch die Anordnung der 42 m langen Leitwerke mit den Pollern zu ersehen. Die Pfähle der Leitwerke bestehen aus vier Viertelringeisen, die im unteren Vorhafen in ausgesprengte Löcher in dem festen Mergelfels eingebracht sind und im oberen auf der Dammschüttung in einem umhüllenden Lehmkern stehen (Text-Abb. 30 S. 270). Auch am Trog sind zahlreiche Poller zum Vertauen der Schiffe angebracht. Die Leitwerke haben sich im Betrieb bisher gut bewährt; sie vermitteln eine bequemere Führung des Schiffes als einseitige Erweiterungen zu Liegeplätzen vor den Schleusenhäuptern. Die Vorhäfen sind beim Hebewerk symmetrisch zur Canalachse auf 40 m Sohlenbreite in 2,50 m Tiefe erweitert und mit Haltepfählen ausgerüstet (Abb. 3 Bl. 30 u. 31). Der untere Vorhafen ist von den Leitwerken bis zur Canalachse der Haupthaltung Herne-Münster nur etwa 200 m lang und hat sich für den Schiffsbetrieb zur Auflösung und Bildung von Schleppzügen als etwas knapp erwiesen. An den oberen etwa 100 m langen Vorhafen schliefst sich noch eine Erweiterung mit 28 m Sohlenbreite in 2,50 m Wassertiefe auf rund 200 m Länge an.

Die Dichtung des Mauerwerks über der Unterführung und der überwölbten Nische am Oberhaupt ist durch eine Monierplatte bewirkt, die auch seitlich in den Stirn- und Flügelmauern hochgeführt ist. Zum Anschlufs an die Lehmdichtung des Obercanals ist über der Monierplatte noch eine 0,30 m starke Schicht aus fettem Lehm aufgebracht. Auch sind die Flügel zur Verhinderung von Aderbildungen bis tief in den gewachsenen Boden hinein mit Lehm bekleidet. Bei dem unterwölbten Unterhaupt ist über dem Stampfbeton allein durch eine Cementputzschicht vollständige Dichtung erzielt. Die Böschungsbefestigung der Vorhäfen aus Bruchsteinpflaster ist in der Neigung 1 : 1 mit einer 0,50 m breiten Berme in Normalwasserhöhe gegen das Mauerwerk geführt, und zwar am Oberhaupt von innen als Kegel gegen die im Grundrifs unter 45° gerichteten Flügel, am Unterhaupt stumpf gegen die Plattform vor den Thürmen.

Die beiden Kreiselpumpen zur Speisung der Dortmunder Haltung sind derart bemessen, dafs jede bei 400 Umdrehungen in der Minute bis zu 0,25 cbm/sec zu leisten vermag; für ihren Antrieb haben sich die zwei schnelllaufenden Elektromotoren von 90 PS ganz besonders bewährt. Das Zuleitungsrohr zum Pumpensumpf unterm Maschinenraum zweigt kurz vorm Unterhaupt durch ein Haupt mit erweitertem Einlauf und engstäbigem Schutzgitter ab und besteht aus einem 1,20 m messenden Monierrohr; das Druckrohr für eine Pumpe hat 0,45 m Durchmesser, für beide zusammen 0,60 m. Es sind zwei Rohre dieser Abmessung von den Pumpen bis zum Auslauf in der oberen im Leinpfaddamm eingebauten Wasserkammer verlegt, die in den Knieen unter dem Leinpfad festliegen und sich im Maschinenhause in Stopfbüchsen bewegen können. Der obere Auslauf in die Wasserkammern ist mit Klappen selbstthätig geschlossen. Vor den Kammern befinden sich Holzklappen zum Abschlufs bei Trockenlegung. Auch das für diese Anlage erforderliche Mauerwerk ist in Stampfbeton ausgeführt. Die Anordnung ist aus den Abb. 2 u. 3 Bl. 30 u. 31 ersichtlich. Ein Umlaufrohr, das oberhalb der Pumpen im Maschinenraum abzweigt und daneben in den Pumpensumpf mündet, dient für die etwaige Entleerung der oberen Haltung.

Die ursprünglich angenommene Bauzeit von $2^1/_4$ Jahren konnte wegen der allerwärts nothwendigen weiteren Durchbildung der Einzelheiten nicht eingehalten werden. Der Bau wurde im Sommer 1894 begonnen, die ersten Trogbewegungen fanden im Juni 1898 und der regelrechte Probebetrieb im

März und April 1899 statt. Die örtliche Bauleitung lag in den Händen des Wasserbauinspectors Offermann, die Ausführung der wichtigsten Arbeiten sind von folgenden Unternehmern ausgeführt: die Brunnenabteufung und die Maschinenanlagen von der Firma Haniel u. Lueg selbst, die gesamten übrigen Eisenarbeiten von der Actiengesellschaft für Eisenindustrie und Brückenbau, vormals Harkort in Duisburg mit Ausnahme der Schraubenspindeln, welche vom Bochumer Verein für Bergbau und Gufsstahlfabrication geliefert wurden. Die elektrischen Anlagen sind von der Elektricitäts-Actiengesellschaft vormals Lahmeyer u. Co. in Frankfurt a. M. hergestellt. Die Gesamtkosten betrugen einschliefslich des Pumpwerks etwa 2,8 Mill. ℳ, wovon auf das Pumpwerk ungefähr 200 000 ℳ anzurechnen sind. Da einzelne Theile beider Werke sich gegenseitig ergänzen, so würde eine getrennte Anlage beider höhere Kosten verursacht haben. Im einzelnen hat gekostet:

1 cbm Mergelfelsaushub für die Brunnen . 7,50 ℳ
1 Tiefen-Meter gufseiserne Auskleidung eines Brunnens mit Hinterfüllung . . . 2450,— „
1 t Flufseisen in fertiger Verbindung und Aufstellung für die gesamten Eisenarbeiten . . . . 360,— „
1 t Gufseisen desgl. für die Gegengewichte und Gleitbahnen usw. . . 400 bis 420,— „ .

Erforderlich waren gegen 600 t Flufseisen für die Schwimmer; etwa 950 t für den Trog, Trogbrücke und Gerüststützen; 550 t für die Führungsgerüste und Canalabschlüsse; ferner 145 t Gufseisen und 44 t für flufsstählerne Maschinen- und Rothgufstheile.

Die vier Schraubenspindeln mit Zubehör an Lagern und Muttern kosteten 227 120 ℳ; die Maschinen für die Kraftanlage, die Bewegung der Spindeln, Thorschützen und Spille im ganzen 236 100 ℳ; die Kabelleitungen insgesamt 10 800 ℳ; ein Wasserröhrenkessel von 100 qm Heizfläche mit Zubehör 17 625 ℳ; schliefslich 1 qm bebaute Fläche des Elektricitätswerks etwa 160 ℳ.

Die jährlichen Betriebs- und Unterhaltungskosten für das Hebe- und Pumpwerk sind aufser den persönlichen Kosten der vier etatmäfsigen Beamten zu 75 000 ℳ veranschlagt, wovon allein 40 000 ℳ auf Betriebsstoffe entfallen; sie werden aber nach den bisherigen Erfahrungen diese Summe kaum erreichen. Eine Trennung der Kosten für das eine oder andere Werk läfst sich nicht durchführen. Als etatmäfsige Beamte sind angestellt: ein Oberbauwart, zwei Werkführer und ein Maschinist; aufserdem erfordert der Betrieb ständig zwei Hülfsmaschinisten, zwei Heizer, vier Schleusengehülfen, drei bis vier Schlosser und drei Arbeiter.

(Fortsetzung folgt.)

Die Strafsenbrücke über die Süderelbe bei Harburg.

Vom Regierungs- und Baurath G. Narten und Prof. S. Müller.

(Mit Abbildungen auf Blatt 35 und 36 im Atlas.)

I. Allgemeines.

1. Verkehr über die Süderelbe. Die Elbe theilt sich oberhalb Harburgs beim sogenannten Bunthaus in die beiden schiffbaren Arme „Süderelbe“ und „Norderelbe“. Die von ihnen umschlossene Insel Wilhelmsburg ist als Schnittpunkt der oberelbischen Binnenschiffahrt mit dem Seeverkehr für gewerbliche Unternehmungen sehr günstig gelegen; seit dem Zollanschlufs und mit dem Aufblühen Hamburgs hat diese Elbinsel eine bedeutende Entwicklung in gewerblicher Hinsicht erfahren. Die Stadt Harburg, am linken Ufer der Süderelbe gelegen, hat sich im Laufe des vorigen Jahrhunderts zu einer wichtigen Handels- und Industriestadt entwickelt. Die Einwohnerzahl ist in den letzten vierzig Jahren von 10 000 auf 50 000 gewachsen; in ähnlichem Mafse ist der Seehandel Harburgs gestiegen. Am rechten Ufer der Norderelbe liegt die gröfste deutsche See- und Handelsstadt, Hamburg. Die Verkehrsmittelpunkte beider Städte sind etwa 10 km von einander entfernt. Bis zum Anfang des vorigen Jahrhunderts fand der Verkehr zwischen Harburg und Hamburg nur auf der Elbe mittels offener Segelfahrzeuge statt.

Eine regelmäfsige Verbindung von Norden nach Süden über die Insel Wilhelmsburg wurde erst im Anfang des vorigen Jahrhunderts von Napoleon geschaffen, der im Jahre 1813 eine hölzerne Jochbrücke über die damals nur theilweise eingedeichte Insel Wilhelmsburg erbauen liefs; der Verkehr von Ufer zu Ufer über die Norder- und Süderelbe wurde durch Ziehfähren bewirkt. Bald nach der Vertreibung der Franzosen wurde die Jochbrücke wieder zerstört; die Ziehfähren blieben im Betriebe. Als sie dem stetig wachsenden Verkehre nicht mehr genügten, wurden sie — 1853 — durch Dampffähren ersetzt. Eine weitere Verkehrserleichterung brachte die im Jahre 1873 eröffnete Köln-Mindener Eisenbahn. Mit der Zeit genügten auch diese Anlagen dem Verkehr nicht mehr; das Bedürfnifs nach festen Strafsenbrücken zum Ersatz der Fähranstalten wurde immer fühlbarer.

Hamburg ging mit dem Bau einer solchen Brücke voran; bereits im Jahre 1888 wurde der Verkehr auf der beim Hamburger Zollanschlufs miterbauten Strafsenbrücke über die Norderelbe eröffnet.

Auch in Harburg kam inzwischen die Frage einer festen Strafsenbrücke ihrer Lösung immer näher.

2. Technische und wirthschaftliche Vorarbeiten. Die Harburger Handelskammer wies in einer Denkschrift vom Jahre 1883 darauf hin, dafs als eine wesentliche Bedingung für die gedeihliche Weiterentwicklung Harburgs die Herstellung einer festen Strafsenbrücke über die Süderelbe anzusehen sei. Die durch Regulirung des Reiherstieges geschaffene bessere Wasserstrafse erforderte als Ergänzung eine entsprechende Landstrafse. Indes bedurfte es noch jahrelanger Verhandlungen, bis die Königliche Staatsregierung sich von der Nothwendigkeit einer festen Strafsenbrücke über die Süderelbe überzeugte. Es sei hierbei bemerkt, dafs die Königliche Wasser-Bauverwaltung zur Unterhaltung und zum Betrieb der Fähranstalt verpflichtet war und alljährlich ganz erhebliche Summen beisteuern mufste, da die Einnahmen aus der Fähranstalt nicht annähernd zur Deckung der Unkosten ausreichten. Aus diesem Grunde erklärte sich auch die Staatsregierung bei den späteren Verhandlungen bereit, den gröfsten

Theil der Baukosten für die geplante Strafsenbrücke zu tragen. — Am 23. Juni 1896 wurde zwischen der Königlichen Staatsregierung und den betheiligten Gemeinden folgendes Uebereinkommen getroffen:

a) Die Stadt Harburg und die Gemeinde Wilhelmsburg nehmen in Aussicht, gemeinsam eine Brücke über die Süderelbe herzustellen, deren Baukosten auf höchstens 2200000 ℳ berechnet sind; die Stadt Harburg wird zu $^2/_3$, die Gemeinde Wilhelmsburg zu $^1/_3$ Bauherr. Es wird dabei vorausgesetzt, dafs zu dem Bau ein unverzinslicher Gesamtbeitrag von mindestens 1800000 ℳ geleistet wird. Nachdem vom Staate ein solcher von 1500000 ℳ, von der Provinz Hannover ein weiterer von 100000 ℳ in Aussicht gestellt ist, würde seitens der Stadt Harburg, des Landkreises Harburg und der Gemeinde Wilhelmsburg noch ein verlorener Betrag von 200000 ℳ bereit zu stellen sein.

b) Aus einem zu erhebenden Brückengelde sollen die Unterhaltungskosten sowie die Verzinsung und Tilgung der übrigen Baukosten bestritten werden.

3. Wettbewerb und Vertragsabschlufs. Hiermit waren die beiden Gemeinden endgültig als Bauherren aufgetreten; der Staat hatte sich nur ausbedungen, dafs die Bauausführung unter Aufsicht der Staatsbauverwaltung zu erfolgen habe. Neben den wirthschaftlichen Verhandlungen waren auch die technischen Vorarbeiten weiter fortgeführt worden. Der von der Wasser-Bauverwaltung aufgestellte Vorentwurf setzte die Kosten für die Erbauung der Brücke auf 2200000 ℳ fest; dieser Betrag war den vorerwähnten wirthschaftlichen Abmachungen zu Grunde gelegt worden. Wie bei ähnlichen grofsen Bauten der letzten Jahre entschlofs man sich auch hier für den ausführlichen Entwurf zu einem allgemeinen, öffentlichen Wettbewerb. Die Vorschriften und das Bauprogramm nebst Unterlagen wurden in der Wasser-Bauinspection Harburg aufgestellt und vom Ministerium der öffentlichen Arbeiten genehmigt. Die Angaben hierüber sowie über das Preisgericht und die Preisvertheilung sind im Centralblatt der Bauverwaltung Jahrgang 1896, S. 464, Jahrgang 1897, 115, 123, 134, 142 u. 158 veröffentlicht. Nach Zuerkennung der Preise löste sich das Preisgericht auf; an seine Stelle trat für die weiteren Verhandlungen eine „Brückenbau-Commission", gebildet aus Mitgliedern beider Gemeinden und dem Baurath Narten, Harburg. Letzterem wurde die Oberleitung des gesamten Baues übertragen.

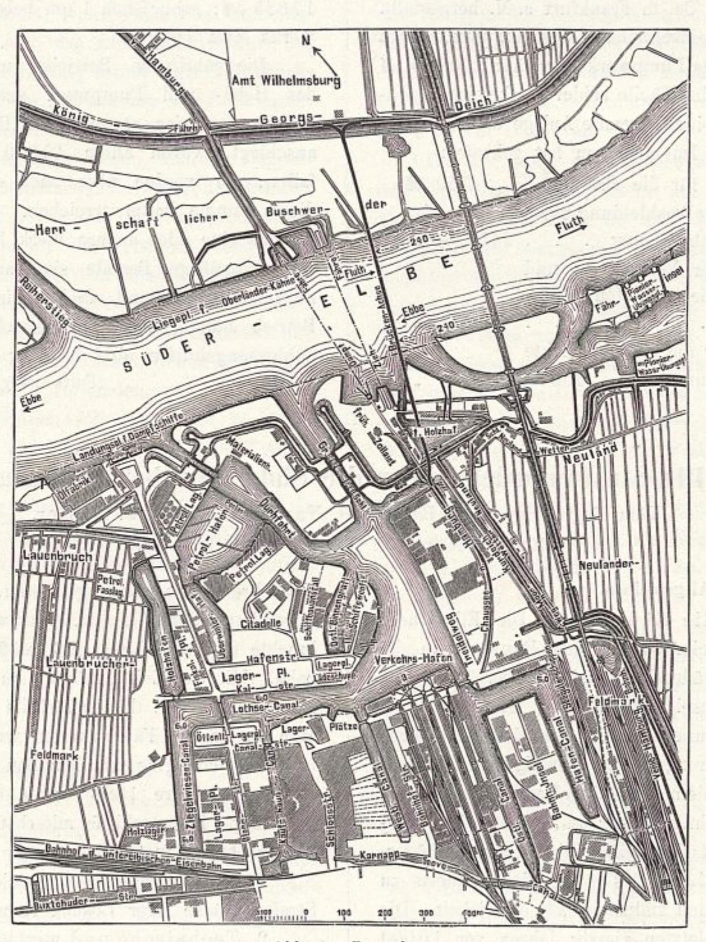


Abb. 1. Lageplan.

Nachdem das Programm noch in einzelnen Punkten Abänderungen erfahren hatte — es wurde unter anderem bestimmt, der Fahrbahn gleich eine endgültige Breite von 7 m zu geben und statt des anfänglich beabsichtigten Holzpflasters Pflaster aus schwedischem Granit zu wählen —, wurden die mit den ersten beiden Preisen ausgezeichneten Firmen, deren Entwürfe sich sehr nahe kamen, nochmals zu einer Preisabgabe aufgefordert. Der mindestfordernden Nürnberger Maschinenbau-gesellschaft wurde am 17. April 1897 die Ausführung übertragen, und für den Vertrag die folgende Grundlage festgesetzt: „Die Nürnberger Maschinenbau-Actiengesellschaft übernimmt die vollständige und betriebssichere Herstellung einer festen Strafsenbrücke über die Süderelbe einschliefsl. aller Nebenarbeiten für die Pauschsumme von 1680000 ℳ." Schon im Mai 1897 konnte mit der Ausführung begonnen werden.

4. Längen- und Höhenverhältnisse des Bauwerkes. In der Achse der Strafsenbrücke hat die Süderelbe bei Niedrigwasser eine Breite von 300 m; die Entfernung der beiderseitigen Stromdeiche beträgt 720 m. Die Brücke liegt im Ebbe- und Fluthgebiet; die Wasserstände sind von den regelmäfsigen Bewegungen der Fluthwelle und aufserdem von der Gröfse des Oberwassers sowie von der Richtung und Stärke des Windes abhängig. Das mittlere Hochwasser liegt auf + 1,78, das mittlere Niedrigwasser auf + 0,28, mithin beträgt die mittlere Fluthgröfse 1,50 m. Bei starken und andauernd östlichen Winden fällt das Niedrigwasser oft bis — 1,0 und zuweilen noch tiefer ab, während bei starken westlichen Winden das Hochwasser bis auf + 3,0 und darüber ansteigt. Das höchste bekannte Hochwasser, vom 1. Januar 1855, erreichte die Höhe von + 5,31. Alle Höhenangaben sind auf Harburger Pegel Null bezogen, für den das Verhältnifs besteht: Harburger Pegel Null = N. N. — 0,085 m. Die durchschnittliche Höhe des Vorlandes beträgt auf der Harburger Seite + 3,0, auf Wilhelmsburger Seite + 1,20; die

Krone der beiden Elbdeiche liegt auf + 5,84. Den Querschnitt des Stromes in der Brückenachse zeigt nachstehende Text-Abb. 3.

Die Achse des neuen Bauwerkes liegt 240 m unterhalb und parallel der alten Eisenbahnbrücke (Text-Abb. 1); für die Linienführung war zwischen den beiden Grenzpunkten, der Eisenbahnbrücke einerseits und der neuen Schleuse anderseits, die Bedingung mafsgebend, dafs die Bauausführung ohne Störung des Fährbetriebes durchgeführt werden mufste.

Wie bei der Eisenbahnbrücke sind bei dem neuen Bauwerk vier Strom- und sechs Fluthöffnungen vorhanden (Abb. 1 Bl. 35). Für den Hochwasserquerschnitt war gleichfalls die wasserständen bis + 3,0 eine Schiffahrtshöhe von 4 m zur Verfügung steht. Die Fluthöffnungen kommen für den Schiffahrtsverkehr nicht in Betracht; deren Unterkante konnte daher auf + 5,40 d. i. wenig über den bislang beobachteten höchsten Hochwasserstand gelegt werden. Bei den Strombrücken erforderte die Fahrbahn eine Constructionshöhe von 1,40 m; die wagerechte Oberkante derselben liegt somit auf + 8,40. Auf der Fluthbrücke ist die Fahrbahn in gleicher Höhe durchgeführt.

In den kurzen Anschlufsdämmen bis zu den Elbdeichen sind Höhenunterschiede von zwei bis drei Metern mit der Steigung 1 : 50 überwunden.

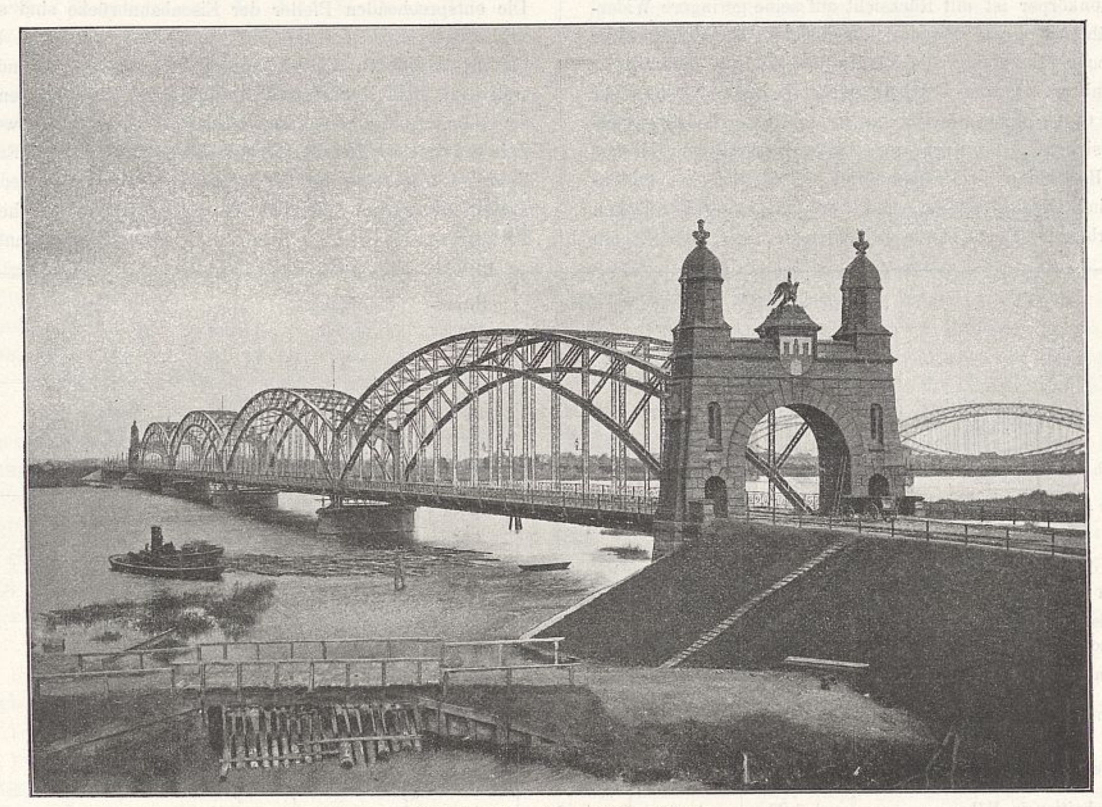


Abb. 2. Gesamtansicht der Brücke.

Nachbarbrücke mafsgebend. Bei den Stromöffnungen liegen die Pfeilermitten genau in den Achsen der Eisenbahnbrücke; die Entfernung von Mitte zu Mitte beträgt 102,0 m. Die Pfeilerstärke ist gegen die alte Brücke um 3,0 m verringert.

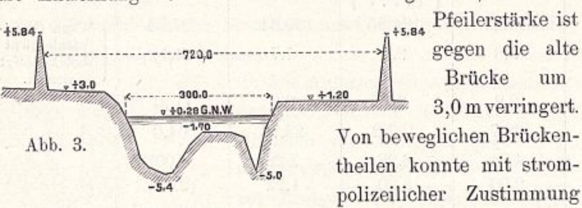


Abb. 3.

Von beweglichen Brückentheilen konnte mit strompolizeilicher Zustimmung abgesehen werden. Die Lichtweite der Fluthbrücken mit 29,35 m entspricht den Mafsen der Eisenbahnbrücke; die Achsenweite beträgt 31,15 m.

Ebenso erhielt die Constructionsunterkante der Strombrücken die gleiche Höhe von + 7,0; für mittleres Hochwasser von + 1,78 ergiebt sich somit eine lichte Durchfahrtshöhe von 5,22 m, während bei den häufiger eintretenden Hoch-

Die Gesamtlänge des neuen Bauwerkes beträgt 1188,40 m. Hiervon entfallen auf den Harburger Anschlufsdamm 197,60 m, die eigentliche Brückenanlage zwischen den Widerlagspfeilern 599,50 m, den Wilhelmsburger Anschlufsdamm bis zum Deich 105,80 m, den König-Georgsdeich bis zur Hamburger Chaussee 285,50 m.

II. Unterbau, Brückenthore und Anschlufsdämme.

1. Pfeiler. Die Strom- und Fluthpfeiler sind in Abb. 5 bis 18 Bl. 35 zur Darstellung gebracht. Für den Unterbau konnte die Gründungsweise der alten Eisenbahnbrücke beibehalten werden, da auch die Bohrungen (vergl. S. 301) die gleiche Bodengestaltung bestätigt hatten. Auf Grundpfählen von 30 cm mittlerem Durchmesser ist zwischen Pfahl- oder Spundwänden ein je nach der Lage 4 bis 6 m starkes Betonbett und auf dieses der eigentliche Mauerpfeiler aufgesetzt. Bei den Pfeilern der Strombrücken sind die Rammtiefe und die Fundamentsohle

nach der benachbarten Eisenbahnbrücke festgesetzt worden. So sind die Grundpfähle der Pfeiler II, III, IV bis — 12,0 am Harburger Pegel gerammt, stehen mithin mindestens 3 m im festgelagerten Kies. Die Pfahlköpfe reichen 30 cm in den Beton hinein. Die Sohle des Pfeilerbettes ist bis auf die unterste Grenze einer etwaigen Auskolkung, die bei ungünstigen Eisversetzungen eintreten könnte, hinabgeführt. Bei geringerer Gründungstiefe hätten Unterströmungen trotz der umschliefsenden Pfahlwände befürchtet werden müssen. Die Unterkante der im tiefen Strom gelegenen Pfeiler II und III liegt auf — 6,0; für den im flacheren Wasser und am ausbuchtenden Ufer gelegenen Pfeiler IV genügte die Tiefe — 4,0. Der Betonkörper ist mit Rücksicht auf seine geringere Widerstandsfähigkeit gegen Eisgang nur bis an das Niedrigwasser ± 0 hochgeführt; auch die Pfahlwände sind in dieser Höhe abgeschnitten. Gegen Auskolkungen sind die Strompfeiler II — IV durch Steinschüttung bis zur mittleren Niedrigwasserlinie gesichert. Der Kern des oberen Mauerpfeilers ist aus harten Backsteinen in Cementmörtel hergestellt; als Verblendung sind Basaltlavasteine, und zwar in den Seitenflächen roh bearbeitete 30 cm starke Schichtsteine, in den Vorköpfen besonders kräftige glatte Quader verwandt worden. Bei den Strompfeilern II — IV verjüngt sich die Pfeilerstärke von 5 m in gebrochener Neigung ($2\frac{1}{2}:1$ u. $10:1$) bis auf 3 m am Gesimse. Die Oberkante schneidet auf + 6,0 ohne weiteren Aufbau mit der Unterkante der Brückenauflager ab. Die freie Lage derselben ergiebt zunächst eine für die Unterhaltung bequeme Zugänglichkeit; ebenso wesentlich ist der ungehinderte Luftzutritt von allen Seiten, welcher den besten Schutz gegen Feuchtigkeit und Schmutzansammlung bietet.

Die Gefahr der Auskolkung ist bei den Fluthpfeilern eine ungleich geringere; an Stelle der Pfahlwand genügte daher eine wesentlich schwächere und kürzere Spundwand. Die entsprechenden Pfeiler der Eisenbahnbrücke sind seinerzeit mittels Brunnen auf den tragfähigen Sandboden hinabgeführt worden. Ein Kostenvergleich dieser Gründungsweise mit dem Pfahlrost führte zur Wahl des letzteren, um so mehr, als die wesentlich einfachere Ausführung weniger Zeit erforderte. Für die Rammtiefe des nahe an der Streichlinie des Stromes gelegenen Portalpfeilers gab der entsprechende Pfeiler der Eisenbahnbrücke einen Anhalt; dort reichen die Pfahlspitzen bis — 11,0 hinab. Die gleiche Tiefe konnte für

	Widerlagspfeiler I	Strompfeiler II	Strompfeiler III	Strompfeiler IV	Uebergangspfeiler V	Fluthpfeiler VI—X	Widerlagspfeiler XI	
Gewicht in t: Verkehrslast	184	367	367	367	184/74	131	74	
Ueberbau	513	1026	1026	1026	513/127	254	127	
Pfeiler	1302	1870	1870	1428	2170	297	885	
Portal	925	—	—	—	925	—	—	
Summe	2924	3263	3263	2821	3993	682	1086	
hiervon Betonbett	342	1325	1325	883	975	107	258	
Anzahl der Grundpfähle	154	63	63	63	121	30	59	
davon Schrägpfähle	92	—	—	—	72	24	44	
Rammtiefe der Pfähle	— 10,0	— 12,0	— 12,0	— 12,0	— 10,0	— 10,0	— 10,0	
abgeschnitten in Höhe	+ 0,30	— 5,70	— 5,70	— 5,70	— 0,90	+ 0,30	+ 0,30	
Belastung eines Pfahles in t	(19)	52	52	45	33	23	(18)	
Länge in m: Pfahlwand	44,9	42,4	42,4	42,4	55,2	—	—	
Länge in m: Spundwand	—	—	—	—	—	31,80	34,00	
Rammtiefe der Pfahlwand	— 4,0	— 9,0	— 9,0	— 7,5	— 4,0	—	—	
Rammtiefe der Spundwand	—	—	—	—	—	— 3,0	— 3,0	
abgeschnitten in Höhe	+ 1,20	± 0	± 0	± 0	+ 1,20	+ 1,20	+ 1,20	
Betonbett: Unterkante	± 0	— 6,0	— 6,0	— 4,0	— 1,20	± 0	+ 1,20	
Betonbett: Oberkante	+ 1,20	± 0	± 0	± 0	+ 1,20	+ 1,20	± 0	
Stärke des Betonbettes in m	1,20	6,0	6,0	4,0	2,40	1,20	1,20	
Mischung (Cement:Kies:Steinschl.)	1 : 7 : 7	1 : 3 : 5	1 : 3 : 5	1 : 3 : 5	{ 1 : 3 : 5 / 1 : 7 : 7 }	1 : 7 : 7	1 : 7 : 7	
Gröfse der Fundamentsohle in qm	129,5	100,3	100,3	100,3	184,85	40,64	97,73	Wenn Grundpfähle nicht berücksichtigt werden.
Beanspruchung des Baugr. kg/qcm	(2,3)	3,25	3,25	2,8	2,2	1,7	(1,1)	
Beanspruchung des Betons am Mauerfufs kg/qcm	(6,3)	2,8	2,8	2,8	2,4	2,2	(1,3)	
Fläche des Mauerfufses qm	41,27	68,7	68,7	68,7	123,2	23,73	64,0	
Pfeilerstärke in m: am Fufs	(4,81)	4,94	4,94	4,94	6,28	2,28	(3,00)	
Pfeilerstärke in m: unter dem Gesimse	(3,00)	2,90	2,90	2,90	5,20	1,22	(2,51)	
Beanspruchung des Mauerwerkes durch den Auflagerstein kg/qcm	42,1	42,1	42,1	42,1	42,1/7,1	12,7	7,2	
Beanspruchung des Auflagersteines durch die Lagerplatte kg/qcm	42,0	42,0	42,0	42,0	42,0/42,9	35,5	42,9	
Auflagerstein: Unterkante	+ 5,40	+ 5,40	5,40	5,40	+ 5,4/+ 4,8	+ 4,80	+ 4,80	
Auflagerstein: Oberkante	+ 6,00	+ 6,00	6,00	6,00	+ 6,0/+ 5,4	+ 5,40	+ 5,40	
Fläche des Auflagersteines (cm)	150/135	150/135	150/135	150/135	{ 150/135 / 105/138 }	120/130	110/130	
Fläche der Lagerplatte (cm)	92/102	92/102	92/102	92/102	92/102.48/50	82/68	48/50	

die wesentlich geringer beanspruchten Pfähle der neuen Brücke als ausreichend erachtet werden. Da bei Harburg die mittlere Fluth täglich bis + 1,78 m reicht und die Fäulnifsgrenze auf rund + 1,0 liegt, so genügte es, die Unterkante des Betonbettes auf ± 0 zu legen; die Pfähle reichen auch hier 30 cm in den Beton hinein. In der Höhe des Vorlandes auf + 1,20 beginnt der verblendete Mauerkörper. Auch die beiden Widerlagspfeiler haben nur ein 1,20 m starkes Betonbett in gleicher Anordnung erhalten.

Die statische Berechnung der Pfahlroste ergiebt für den einzelnen Pfahl eine Gröfstkraft von 52 t, wobei jedoch der gesamte Pfeilerdruck dem Pfahlrost zugewiesen wird. In Wirklichkeit übernimmt aber der durch die Rammpfähle zusammengeprefste Untergrund einen wesentlichen Theil des Druckes unmittelbar aus der Betonplatte, sodafs in Rücksicht hierauf die theoretische Pfahlkraft von 52 t nach den Erfahrungen bei der älteren Elbbrücke zugelassen werden konnte. Die bei den einzelnen Pfeilern in Betracht kommenden Gewichte, Querschnittsabmessungen usw. sind mit den berechneten Beanspruchungen in der nebenstehenden Tabelle zusammengestellt.

Die Gesamtkosten der Pfeilerbauten von 407 000 ℳ vertheilen sich wie folgt:

Widerlagspfeiler I	49 000 ℳ
Strompfeiler II	66 000 „
„ „ III	66 000 „
„ „ IV	62 000 „
Uebergangspfeiler V	59 000 „
Fluthpfeiler VI—X	je 15 000 „
Widerlagspfeiler XI	30 000 „

Als Einheitspreise sind hierbei gezahlt worden:

für einen Grundpfahl der Strompfeiler	67,50 ℳ
desgl. der Fluthpfeiler	56,00 „
für 1 m Pfahlwandlänge	190,00 „
„ „ Spundwandlänge	87,00 „
für 1 cbm Beton (1:3:5) unter Wasser	26,00 „
desgl. (1:7:7) über Wasser	21,50 „
für 1 cbm Mauerwerk	28,25 „
für 1 cbm Verblendungsmauerwerk	117,00 „

Als Material kamen zur Verwendung

für den Beton: Portlandcement aus der Cementfabrik Alsen (Zweigfabrik Itzehoe),
Grubenkies aus Hitzacker (Julius Kochner),
Steinschlag aus den Plötzkyer Brüchen (Dünnling, Schöneberg);

für die Verblendung: Basaltlava aus Cottenheim in der Eiffel (Firma: Zervas Söhne).

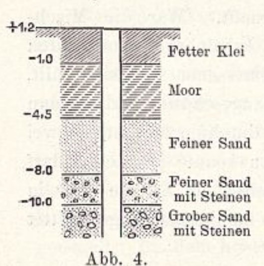


Abb. 4.

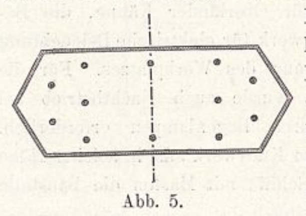
Die Aufsenarbeiten begannen mit der Untersuchung des Baugrundes. Obgleich die Annahme gerechtfertigt erschien, dafs die Untergrundverhältnisse der Eisenbahnbrücke auch 240 m unterhalb zutreffen würden, konnte man sich gegen unangenehme Ueberraschungen nur durch besondere Bohrungen sichern. Nach Text-Abb. 4 besteht der Baugrund im wesentlichen aus Kies und feinem Sand, der an den Ufern von Klei- und Moorschichten wechselnder Gestaltung überdeckt ist. Die Absteckungsarbeiten konnten auf beiden Stromufern von der Eisenbahnbrücke aus mit grofser Genauigkeit ausgeführt werden; im Strome selbst wurde oberhalb jedes Strompfeilers auf einem besonderen Absteckgerüst ein Festpunkt geschaffen, von dem aus die Lage des Pfeilers bestimmt und jederzeit bequem geprüft werden konnte.

Für Werkplätze war auf beiden Ufern genügend Raum vorhanden. Auf Harburger Seite wurde zwischen dem Durchstich und dem Strafsendamm (Abb. 21 Bl. 35) ein Baubureau mit einem gröfseren Materialienmagazin aufgestellt. Eine Reihe anderer Baubuden dienten als Tischlerwerkstätte, Schmiede, Aufenthaltsräume für Arbeiter und dergleichen. Bis auf den Uferrand bei Pfeiler I liegt dieses südliche Vorland über + 3,0 d. i. über den kleineren Sturmfluthen, die für die Sommermonate der Bauzeit allein in Betracht kamen. Ein niedriger Ringdamm genügte, um die Baustelle des Widerlagers trocken zu halten. Das Wilhelmsburger Vorland liegt erheblich tiefer (+ 1,20); die täglichen Fluthen reichen bis an den Elbdeich. Um auch hier im Trocknen arbeiten zu können, mufste ein Ringdeich um das ganze Baugelände hergestellt werden (Abb. 22 bis 24 Bl. 35). Auf der Ostseite des Dammes war eine Deichschleuse eingebaut, die bei besonders hohen Fluthen, die den Ringdeich gefährden konnten, zum Einlassen des Wassers und bei Ebbe zum Ablassen desselben diente. Innerhalb der Eindeichung wurden Lagerplätze für Kies und Werksteine, Arbeitsplätze für Zimmerleute, Baracken, Cementbuden und dergleichen angelegt. Ein Landesteg mit Krahnanlage, ein Karrsteg für Oberländer Kähne, die Betonirungsanlage und das Kraftwerk für elektrische Beleuchtung bildeten die weitere Ausrüstung des Werkplatzes. Für die Betonirung der Strompfeiler wurde auch Nachtbetrieb bei elektrischer Beleuchtung durch Bogenlampen erforderlich. Die Leitungsdrähte waren vom Kraftwerk aus in solcher Höhe über die Elbe geführt, dafs Schiffe mit Masten die Baustelle ungehindert durchfahren konnten.

Wegen andauernden, starken Sandzutriebes konnte die Tiefe für die Betonirung der Strompfeiler im freien Strom durch Baggerung nicht hergestellt werden. Es mufste zunächst die Pfahlwand geschlagen werden, und innerhalb derselben wurde die erforderliche Tiefe durch Greifbagger und Verticalbagger geschaffen. Zum Schlagen der Pfähle des Absteckgerüstes kam eine einfache Zugramme zur Verwendung; im übrigen wurden sowohl Pfahlwände wie Grundpfähle durch Menck- und Hambrocksche Dampfkunstrammen mit rücklaufender oder endloser Kette bei 1100 kg Bärgewicht geschlagen. Eine direct wirkende Dampframme kam nur kurze Zeit beim Widerlagspfeiler XI zur Verwendung; die schon ältere Maschine forderte zu häufige Instandsetzungen und mufste daher bald aufser Dienst gestellt werden. Im Durchschnitt wurden täglich mit jeder der sieben gleichzeitig im Betriebe befindlichen Rammen $3\frac{1}{3}$ Pfähle geschlagen; die gesamten Rammarbeiten waren in 12 Wochen beendet. Bei den Strompfeilern III und IV gestaltete sich der Arbeitsgang im wesentlichen gleich. Von einer schwimmenden Rüstung aus wurden zunächst die in nachstehender Text-Abb. 5 eingezeichneten zwölf Grundpfähle geschlagen und an diese kräftige Führungszangen für die Umfassung angerüstet; alsdann konnten auch die Kantpfähle der Seitenwände mit genügender Sorgfalt gerammt werden. Daran schlofs sich das Ausheben des Bodens aus den Pfeilergruben

Nr.		Zug-ramme	Direct wirkende Dampf-ramme	Dampf-Kunstramme									
				I		II		III		IV	V	VI	VII
		schwimmend	fest	schwimmend	fest	schwimmend	fest	schwimmend	fest	fest	fest	fest	fest
1	Bärgewicht . . . . . . kg	300	1400	1200	1200	1100	1100	1100	1100	1400	1100	1000	1000
2	Fallhöhe . . . . m	1,0—1,5	1,6	3,0—3,5	3,0	3,0	2,0	2,0	3,0	3,0—3,5	2,0	1,5—4,0	3,5—4,0
3	Bedienung . . . . . . Mann	20	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	Dauer der Thätigkeit beim Rammen der Pfahlwand in Tagen	—	—	18	—	—	18	22	—	16	38	18	4
5	Pfahl-, bezw. Spundwandlänge in m	—	—	44,6	—	—	42,4	40,2	—	65,8	127,2	55,2	44,9
6	Durchschnittl. Rammtiefe m	—	—	6,5	—	—	6,0	6,5	—	4,2	4,2	5,0	5,0
7	Bauart der Ramme	—	Bauart Figée	← mit rücklaufender Kette Menck u. Hambrock →								mit endlos. Kette M. u. H.	
8	Tägl. Durchschnitt: Pfahlwandlänge in m	—	—	2,5	—	—	2,4	1,8	—	4,1	3,4	3,1	11,2
9	Tägl. Durchschnitt: Spundwandlänge in m	—	—	40,6	—	—	36,0	29,3	—	43,0	35,7	38,8	140,0
10	Tage der Thätigkeit beim Pfahlrammen	10	19	14	39	10	—	—	19	64	—	23	19
11	Gerammte Pfähle	18	39	25	112	20	—	—	53	170	—	121	154
12	Tägl. Durchschnitt: Anzahl der Pfähle .	1,8	2,1	1,8	2,9	2,0	—	—	2,8	2,7	—	5,3	8,1
13	Tägl. Durchschnitt: Rammtiefe der Pfähle in m	8,0	21,0	16,2	29,0	18,0	—	—	25,2	27,0	—	58,3	81,0
14	Durchschnittl. Rammtiefe m	5,0	10,0	9,0	10,0	9,0	—	—	9,0	10,0	—	11,0	10,0

bis auf — 6,0; schliefslich konnten die übrigen Grundpfähle von einer feststehenden Ramme geschlagen werden, für welche die ersten zwölf Pfähle mit den Seitenwänden eine bequeme Plattform ergaben. Beim Pfeiler II mufste man auch die Pfahlwand von einem festen Gerüst rammen; das naheliegende flache Ufer hätte für die schwimmende Ramme keine genügend freie Bewegung zugelassen. Diese Umfassungswände erwiesen sich bei dem späteren Auspumpen weit dichter als die übrigen und haben trotz der besonderen Rammrüstung keine Mehrkosten verursacht, wenn man die später erforderlichen Pumparbeiten mit in Betracht zieht. Die Ergebnisse der Rammung sind in vorstehender Tabelle zusammengestellt, aus der die Leistungen der einzelnen Rammen ersichtlich sind. Nach Vollendung der Rammungen wurde die Sohle mittels eines Verticalbaggers nachgebaggert und abgeglichen.


Abb. 5.

Die Ausführung der Landpfeiler gestaltete sich wesentlich einfacher. Waren die Spundwände geschlagen, so konnte zwischen den gegenseitig abgesteiften Umschliefsungswänden das Ausheben des Bodens und alsdann das Rammen der Grundpfähle im Trockenen erfolgen Nur bei Pfeiler V erwies sich der Wasserzudrang so stark, dafs die unteren Schichten unter Wasserhaltung herausgeschafft werden mufsten.

Die Grundpfähle konnten bei den Landpfeilern im Trockenen abgeschnitten werden; im Strome geschah dies mit Hülfe von Tauchern, die im Durchschnitt täglich 20 Pfähle kappen konnten. Die Pfahlwände wurden bei den Strompfeilern auf + 3,70 abgeschnitten; sie dienten in dieser Höhe als Unterbau für die Beton- und Mauergerüste und gleichzeitig als Abschlufswand zur Trockenhaltung der Baugrube (Text-Abb. 6). Nach dem Bauvorgange bei der neuen Hamburger Elbbrücke wurde an der Innenseite der Pfahlwand von + 3,50 bis — 1,0 dreimal getheertes Segeltuch noch vor Schlufs der Betonirung eingehängt und am oberen Saum an die Wand festgenagelt; unten waren Eisenstäbe eingenäht, die ein glattes Anliegen an die Umfassungswand bewirkten. Während der Betonirung, solange ein Aufquellen des Wassers durch die frische Schüttung sorgfältig vermieden werden mufste, war der Innenspiegel der Baugrube durch einen Ausschnitt in der Pfahlwand und im Segeltuch mit dem wechselnden Aufsenwasserstand in Verbindung gebracht.

Zu dem Beton ist ausschliefslich Portlandcement ohne Zusatz von Trafs, Gips oder anderen Beimengungen verwandt worden. Allerdings forderte das schnelle Abbinden ein thunlichst rasches Einbauen nach der Herstellung. Für die Schüttung unter Wasser wurde eine Mischung von 1 Raumtheil Cement, 3 Theile Kies und 5 Theile Steinschlag, — für den im Trockenen zu schüttenden Stampfbeton eine schwächere von 1 Raumtheil Cement, 7 Theile Kies und 7 Theile Steinschlag verwandt. Die Zulässigkeit dieser verhältnifsmäfsig mageren Mischungen war vorher durch hydraulische Druckversuche erprobt worden. Die Betonmühle (Abb. 19 u. 20 Bl. 35) stand auf einem besonderen Pfahlgerüst hart am Wilhelmsburger Ufer; Kies und Steinschlag wurden von den Lagerplätzen auf einer Bohlenrampe fortlaufend herangeschafft. War die Mischtrommel (Patent Kuntze-Kempten, Inhalt 0,5 cbm) durch die vorgeschriebene Anzahl der abgemessenen Karren gefüllt, so wurde der zugehörige Cement hinzugeschüttet und alsdann der Inhalt zunächst trocken, dann durchfeuchtet etwa zwei Minuten gemischt. Der fertige Beton konnte je nach Bedarf in die Förderschuten für die Baustellen im Strome oder in die Kippwagen für die Fluthpfeiler unmittelbar abgeschüttet werden.

Bei den Strompfeilern wurde der Beton in einzelnen Lagen eingebracht, und zwar mittels der in der Zeitschrift für Bauwesen 1890, Seite 354 dargestellten eisernen Beton-

versenkkästen. Zweitheilige Bodenklappen werden durch die Spannung der Trageketten geschlossen gehalten, bis der Kasten den Boden berührt und wieder angehoben wird; den Arbeitern ist es unmöglich, die Kasten beliebig zu öffnen und den Beton aus beträchtlicher Höhe durch das Wasser zu Boden fallen zu lassen. Mit Hülfe eines für alle Strompfeiler nacheinander benutzten Portalkrahnes wurden die Kasten schnell an jeder beliebigen Stelle versenkt; der Antrieb erfolgte durch eine rasch arbeitende Dampfwinde. Nicht unerhebliche Schwierigkeiten bot das Verbringen des betriebsfertigen Krahnes von einer Baustelle zur anderen; das jedesmalige Abrüsten hätte erhebliche Mehrkosten und Zeitverlust zur Folge gehabt. Eine Förderschute, die ein Jochgerüst mit Laufschienen erhalten hatte, wurde in die Flucht der Pfahlwand gebracht; waren die Schienen bei steigendem Fluthwasser in gleiche Höhe mit denen der Baugrube gekommen, dann mufste in möglichst kurzer Zeit eine Verbindung geschaffen und der Krahn herüber gerollt werden, ehe das steigende Wasser einen wesentlichen Höhenunterschied ergab. Entsprechend gestaltete sich das Absetzen an der nächsten Baugrube bei Ebbestrom. Im Durchschnitt wurden täglich 50 cbm Beton hergestellt und eingebaut; gegen Schlufs, als die Mannschaft eingearbeitet war, konnte man bei Tag- und Nachtbetrieb bis 180 cbm leisten. Die Betonirung eines Strompfeilers nahm zehn Tage in Anspruch. Bei den Fluthpfeilern und den Widerlagern I und XI wurde der Beton durch Kipper in die Baugrube hineingeschüttet und im Trockenen eingestampft.

Das Beton-Versenkungsgerüst für den Uebergangspfeiler V ist in Abb. 13 u. 14 Bl. 36 zur Darstellung gebracht.

Zwei Wochen liefs man den Beton erhärten; alsdann wurden die Baugruben mittels Kreiselpumpen entleert. Zur Aussteifung des Segeltuches waren mit demselben bei der letzten Betonschicht in kurzen Abständen (20 cm) senkrechte Bohlen an der Innenseite angebracht worden; mit dem sinkendem Wasserstande wurden sie an die Pfahlwand festgenagelt. Bei dem hohen Wasserdrucke von fast 4,0 m waren Undichtigkeiten und Beschädigungen des Segeltuches nicht ganz zu vermeiden; doch brauchte täglich kaum mehr als zwei bis drei Stunden gepumpt zu werden. Auf ± 0 wurde der Betonkörper abgeglichen und die Aufmauerung in Angriff genommen. Der Cementmörtel wurde auf einer neben dem Strompfeiler liegenden Schute hergestellt, Ziegel- und Werksteine aus einer zweiten Schute nach Bedarf entnommen. Nach Fertigstellung des Mauerwerkes konnte bei besonders niedrigen Wasserständen die Pfahlwand auf ± 0 mit der Handsäge abgeschnitten werden.

Bereits Ende 1897 waren sämtliche Pfeiler fertiggestellt. Die Aufeinanderfolge und Dauer der einzelnen Arbeiten ist in Text-Abb. 7 (S. 307) zur Darstellung gebracht.

2. Brückenthore. Die beiden steinernen Thore auf den Uferpfeilern des Stromes (I und V) sind nur aus ästhetischen Gründen angeordnet; sie sollen dem leichten Eisenwerk der Stromöffnungen einen angemessenen Abschlufs geben. Der Entwurf für die Thore ist dem ersten preisgekrönten Entwurfe entnommen und von dem Architekten Georg Thielen in Hamburg aufgestellt. Ein in kräftigen Formen gehaltener, burgthorartiger Aufbau wird über den seitlichen Eingängen für die Fufsgänger durch je ein Thürmchen gekrönt, während der Hauptbogen über der mittleren Fahrstrafse durch einen hohen eisernen Adler hervorgehoben wird. Unter diesem ist auf dem südlichen Thor das Harburger, auf dem nördlichen das Wilhelmsburger Wappen angebracht; die Seitenflächen beider Thore zeigen den Reichsadler. Als Verblendung wurde der durch seinen warmen Ton ausgezeichnete rothbraune Portasandstein verwandt; die Glasmosaikarbeiten für die Wappen sind von der Firma Puhl und Wagner (Berlin), die Kunstschmiedearbeiten der Adler von dem Hofkunstschmiedemeister Paul Marcus (Berlin) ausgeführt worden. Die Gesamtkosten eines Portales belaufen sich auf 46000 ℳ; hierbei sind als Einheitspreise gezahlt

für 1 cbm Mauerwerk	28,25 ℳ
„ 1 cbm Verblendung	130,00 „
„ 1 qm Mosaikwappen	300,00 „
„ 1 schmiedeeisernen Adler	900,00 „

3. Strafsendämme. Auf dem nördlichen Ufer hat der Wilhelmsburger Strafsendamm, den Fluthbrücken entsprechend, eine Breite von 10 m mit beiderseitigem Schutzstreifen von je 0,25 m erhalten. Der Anschlufsdamm folgt zunächst der Brückenachse etwa 40 m und geht dann mit



Abb. 6.

50 m Halbmesser in die 10,5 m breite Fahrstrafse des früheren König Georgs-Deiches über; er erreicht diesen in einer Neigung von 1:50 und verläuft dann wagerecht auf + 6,38 bis zum Anschlufs an die Hamburger Chaussee. Auf dem Südufer durchschneidet der Strafsendamm zunächst den früheren Holzhafen, kreuzt den Elbdeich an der Moorwetter und geht alsdann in einem schlanken S-Bogen in die Hamburger Strafse über. Der abgeschnittene Holzhafen mufste

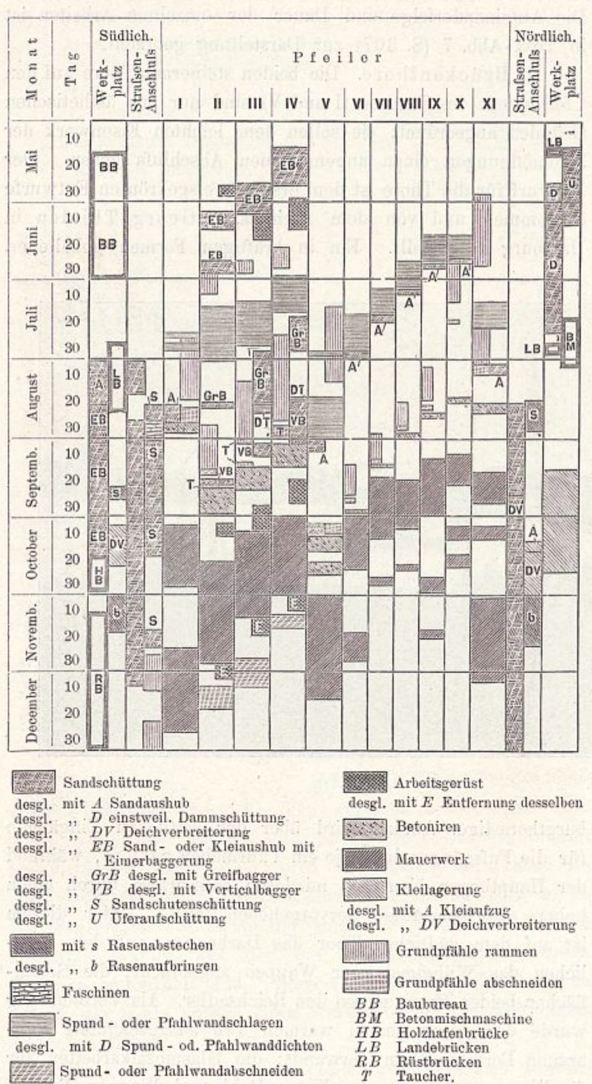


Abb. 7. Arbeitsleistungen im Jahre 1897.

durch einen Durchstich mit dem Drehbrücken-Canal wieder verbunden werden, um so die Vorfluth für die beiden einmündenden Entwässerungsgräben — die Moorwetter und die Neulander Wetter — wieder herzustellen. Die Böschungen der Strafsendämme haben im allgemeinen die Neigung 1:2 erhalten; nur am Harburger Elbdeich machte die Umgehung eines Privatgrundstückes steilere Böschungen 1:1 erforderlich. Diese, ebenso wie die steilen Kegel der Widerlagspfeiler, sind durch Steinpackung gesichert worden. Die Fahrbahn besteht aus Granitreihenpflaster auf Kiesunterlage; die Fufswege sind mit Bockhorner Klinkern abgedeckt. — Auf beiden Seiten des Stromes ist neben der Fahrstrafse ein Einnehmerhäuschen vorhanden. Die leichten Fachwerkbauten sollen nur als Diensträume dienen.

Der südliche Strafsendamm erhielt wegen des ungünstigen, schlickartigen Untergrundes in der ganzen Länge des Holzhafens zunächst eine Unterlage durch Sinkstücke aus Busch. Trotzdem noch kräftige Steinschüttungen darauf gebracht wurden, trat später doch ein Ausrutschen des halb fertigen Dammes ein. Erst nachdem der Böschungsfufs durch eine Kleischicht mit Steinabdeckung gegen Durchströmungen gesichert war, kam der Damm völlig zur Ruhe. Als Schüttungsmaterial wurde der aus dem Durchstiche gewonnene Boden sowie Baggersand aus der Süderelbe verwandt. Auf Harburger Seite konnten die unteren Lagen unmittelbar aus Schuten ausgeworfen werden, während später der Boden auf eine Gerüstbrücke gehoben und von dort durch Kipper weiter befördert wurde.

Für die Herstellung der Strafsendämme waren erforderlich: 40 000 cbm Bodenschüttung zu je 1,25 ℳ, 4800 qm Böschungsbefestigung durch Flachrasen zu je 0,65 ℳ, 3600 qm Granitreihenpflaster zu je 10,25 ℳ, 1500 qm Klinkerbelag der Fufswege zu je 4 ℳ, 1200 m Geländer aus Gasrohren mit gufseisernen Ständern zu je 7 ℳ, 1000 m Bordsteine zu je 6,85 ℳ. Die Kosten der Strafsendämme betrugen einschl. der Beleuchtungsanlage 130 000 ℳ.

III. Ueberbau.

1. Fahrbahn. Die mittlere Fahrstrafse hat durchweg eine Breite von 7 m erhalten; ihre Mitte liegt — abgesehen von den Höhenschwankungen infolge der Wärmeunterschiede im Bogen — wagerecht auf + 8,40. Die Pflasterdecke erhielt ein zweiseitiges Quergefälle (im Mittel 1:80) und aufserdem längs den Bordkanten ein geringes Längsgefälle nach den Ablaufkästen, die in Abständen von 12,62 m (2 × Feldweite 6,31) das Wasser unmittelbar in den Strom herabfallen lassen. Die Fufswege haben auf den Fluthbrücken eine Breite von 1,50 m zwischen Bordkante und Geländer erhalten. Ebenso grofs ist bei den Bogenbrücken das Lichtmafs zwischen Geländer und Aufsenkante der Hängepfosten; bis zur Bordkante beträgt die Breite 2,45 m. Die Asphaltdecke hat nach der Fahrstrafse zu ein Quergefälle von 1:50 erhalten. Die Gesamtbreite zwischen den Geländern beträgt bei den Fluthbrücken 10 m, bei den Strombrücken 12,90 m.

Die innere Ausgestaltung ist bei den Strom- und Fluthbrücken im wesentlichen gleich. Ein Gerippe von Quer- und Längsträgern mit dazwischen gespannten Hängeblechen bildet eine grofse Tafel, welche durch die Betonausfüllung und das Pflaster eine grofse Steifigkeit erhalten hat. Bei der Verbindung der Fahrbahn mit den Hauptträgern wollte man Nebenspannungen nach Möglichkeit vermeiden. Die Querträger sind in den Hängestäben der Stromöffnungen und in den gespreizten Pfosten der Fluthbrücken beweglich auf einem Kipplager gelagert, so dafs die Hauptträger — unabhängig von den Durchbiegungen der Querträger — lediglich durch senkrechte Kräfte belastet werden. Ein Dorn in der Mitte jeder Lagerplatte verhindert seitliches Wandern der Querträger und überträgt — in den Stromöffnungen — die Windkräfte in die wagerechte Verspannung; umgekehrt werden die Obergurte der Fluthbrücken durch die Fahrbahn gegen einander abgesteift. Bei der grofsen Spannweite der Bogen-

träger wurde es aufserdem für erforderlich erachtet, ihre Fahrbahn von den elastischen Längenänderungen der Hauptträger unabhängig zu machen. Zur Verhinderung willkürlicher Längsverschiebungen und zur Aufnahme von Bremskräften genügte eine feste Verbindung zwischen Fahrbahn und Zugband; sie ist in die Brückenmitte gelegt worden, um die gegenseitigen Längsverschiebungen zwischen Fahrbahn und Hauptträger gleichmäfsig nach den Enden hin zu vertheilen. Nur die Endquerträger gehören nicht zu dem beweglichen Theil der Fahrbahn; sie bilden mit dem Endpfosten und dem oberen Querriegel einen steifen Windrahmen. Die Längsträger sind nur im Endfelde auf den Endquerträgern beweglich mittels Kipplager (ohne Dorn) gelagert; im übrigen sind sie mit den Querträgern fest vernietet.

Die freischwebende Fahrbahntafel ruht in den Hängepfosten auf gufsstählernen Kippstühlen. Diese Gufsstahllager sind einmal durch einen Stahldorn gegen die Fahrbahn festgelegt, anderseits auch an die senkrechten Gitterstangen fest angebolzt. Demzufolge müssen die Pfosten mit ihren unteren Enden den Längsverschiebungen der Fahrbahn gegen die Hauptträger folgen und haben daher in der Längsrichtung der Brücke nur ein geringes Trägheitsmoment erhalten. Das Zugband hängt an Schraubenbolzen in länglichen Löchern, deren Spielräume nach den Brückenenden den wachsenden Bewegungen des Zugbandes gegen die Fahrbahn entsprechen. Die Einzelheiten dieser Lagerung zeigen Abb. 17, 26 u. 27, 32 bis 34 Bl. 36.

Die obere Gurtung des normalen Querträgers folgt dem Strafsenquerschnitt, die untere ist im mittleren Theile wagerecht; die Trägerenden sind nach oben auf 500 mm Höhe eingezogen. Zwischen den Querträgern und mit ihnen in der Oberkante bündig sind innerhalb der Trägerwände sechs Längsträgerzüge vorhanden; je zwei sind durch einen leichten Querverband gegen einander abgestützt.

Die cylindrisch gekrümmten Hängebleche haben die reichliche Stärke von 7 mm erhalten. Auf den Längsträgern sind sie durch besondere Decklaschen dicht vernietet; an den Querträgern sind sie durch buckelplattenartige Pafsstücke seitlich abgeschlossen (Abb. 23 u. folg. Bl. 36). Zur Ausfüllung der Belagbleche ist ein magerer Beton in einem Mischungsverhältnisse von 1 Theil Cement, 2 Theilen Sand, $4\frac{1}{2}$ Theilen Kies zur Verwendung gekommen. Die im Mittel 15 cm starke Decke ist gegen Sickerwasser durch einen 2 cm starken Ueberzug von zähem Gufsasphalt geschützt. Auf einer weiteren Zwischenlage von 5 cm Kies ruht das 10 cm hohe Steinpflaster aus Granitwürfeln; die Fugen sind sorgfältig mit Asphalttheer vergossen. Ueber die neue Brücke soll eine Strafsenbahn von Hamburg nach Harburg geführt werden, die Gleise sind bereits in die Fahrbahn bündig eingebettet (Abb. 17 Bl. 36). Aufserhalb der Tragwände ruhen zwei Längszüge auf den Kragenden der Querträger. Ein Rost von Zoreseisen ist mit Kiesbeton und alsdann mit einer 2 cm starken Asphaltschicht abgedeckt.

An den Enden jeder Brückenöffnung sind die Köpfe der Längsträger durch einen leichten Querträger abgeschlossen, an dessen obere Kante die Längenausgleich-Streifen aus geripptem Stahl angebolzt sind.

2. Tragwerk der Strombrücken. Das Hauptträgersystem der vier gleichen Strombrücken ist ein Bogenfachwerk mit aufgehobenem wagerechtem Schube.

Die Stützweite von 100,96 m zerfällt in 16 Fache zu 6,31 m; es beträgt:

die Gesamthöhe in der Mitte 17 m $\left(\sim \frac{1}{6} l\right)$,

die Fachwerkhöhe in der Mitte 3,2 m $\left(\sim \frac{1}{30} l\right)$,

der Gurtabstand am Endpfosten 8,65 m,

die Entfernung der Hauptträgermitten 8,30 m.

Die obere Gurtung entspricht in ihrer Form dem Druckbogen der benachbarten Eisenbahnbrücke; ihre Knotenpunkte liegen auf einer Parabel von der Gleichung

$$y^2 = 2 \cdot 1526 \cdot x.$$

Die untere Gurtung bildet eine ellipsenähnliche Curve; das Zugband liegt wagerecht. Diese Uebereinstimmung der

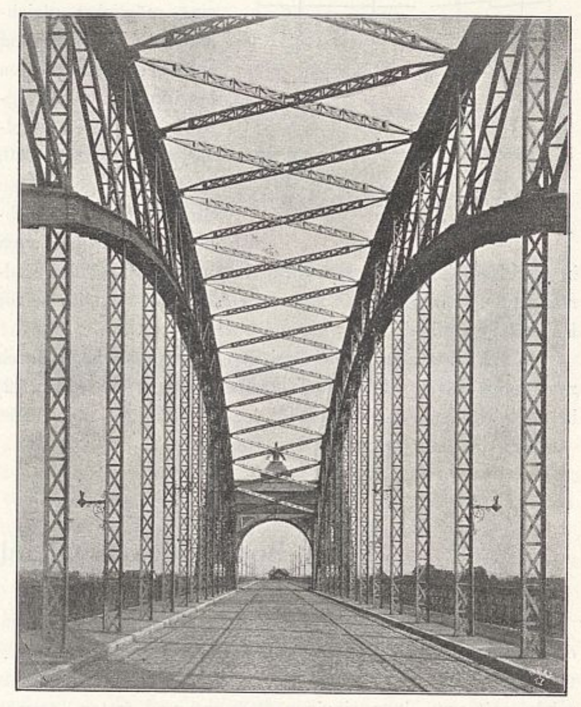


Abb. 8.

oberen wie unteren Begrenzung war durch ästhetische Rücksichten bedingt; neben dem benachbarten Lohse-Träger durfte das neue Bauwerk in den Hauptlinien keinen zu auffallenden Gegensatz bilden. Wohl aber war in der inneren Ausbildung eine Verschiedenheit nicht nur zulässig, sondern mit Rücksicht auf die stets eintönige Wirkung zweier ganz gleicher Bauwerke geboten. Für sich betrachtet bietet die neue Form mit der klaren Anordnung seiner nur wenigen Tragglieder ein ungleich ruhigeres Bild; ebenso giebt die kräftige Bogenform, das leichte Fachwerk und die klare Windversteifung eine wesentlich wirkungsvollere Innenansicht (Text-Abb. 8). Auch ermöglicht das Fehlen störender Diagonalen in der Augenhöhe eine freie Aussicht nach beiden Seiten des Stromes. In technischer und wirthschaftlicher Beziehung zeigt das neue Bauwerk gegenüber dem Lohse-Träger und gegenüber einem einfachen Balkenträger erhebliche Vorzüge, z. B. geringe Herstellungskosten im Werk infolge der wenigen, einfachen Knotenpunkte, geringen Eisenverbrauch, ungehinderten Querverkehr.

Die Aussteifung der Hauptträger und Aufnahme der Windkräfte geschieht durch eine obere und eine untere Verspannung; erstere liegt in der Wölbfläche des Obergurtes, letztere wagerecht in der Ebene des Zugbandes. Der untere Windverband (Text-Abb. 9) besteht aus gekreuzten, auf Zug und Druck beanspruchten Streben ohne Ständer; nur in den Endfeldern sind die Diagonalen ungekreuzt zu Spitzen zusammengeführt. Die Stützung in der Mitte der Endquerträger soll eine möglichst gleichmäfsige Uebertragung auf beide Endpfosten bewirken. In dem Tragwerk des oberen Windverbandes (Text-Abb. 10) sind die gekreuzten Streben der Gleichmäfsigkeit halber auch in den Endfeldern durchgeführt. Der obere Riegel des Endrahmens ist durch den kurzen Druckständer a in seiner Knicklänge getheilt.

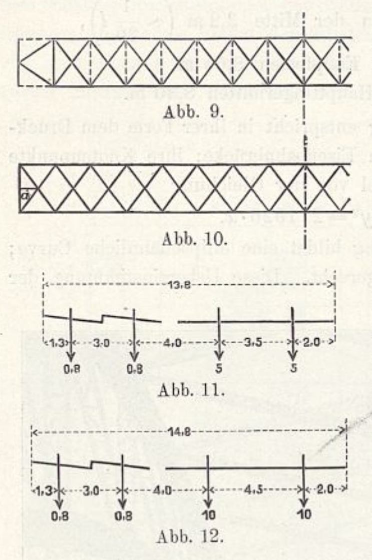


Abb. 9. Abb. 10. Abb. 11. Abb. 12.

Verkehrslasten. Die mittlere Fahrstrafse kann durch zwei neben einander fahrende Wagenreihen (Text-Abb. 11 u. 12) belastet werden; das schwerere Fuhrwerk hat 5 t, das leichtere 2,5 t Raddruck — bei 2,5 m Ladebreite und 1,5 m Radstand. Neben den Wagen kann Menschengedränge von 400 kg/qm eintreten. Bezüglich des 20 t-Wagens ist die Einschränkung zugelassen worden, dafs derselbe nur in der Brückenmitte oder höchstens 75 cm seitwärts fahren dürfe. — Für die Berechnung der Hauptträger ist im Hinblick auf die grofse Spannweite, die weite Entfernung der Hauptträger und die Ausgleichung der Belastungen durch die steife Fahrbahn eine gleichförmige Belastung von 350 kg/qm zu Grunde gelegt.

Eigengewichte. Das Gesamtgewicht einer Strombrücke beträgt 1103 t; mithin entfallen auf 1 m Brückenlänge 10,854 t, gegenüber 4,2 t infolge von Verkehrsbelastung, sodafs $g:p = \backsim 2{,}6$ ist. Die Zusammensetzung des Eigengewichts ist in nachstehender Tabelle angegeben.

Auf 1 m Brückenlänge kommen	Gewicht der Einheit	Gewicht f. 1 m Brückenlänge
1. 7 qm Granitreihenpflaster	280 kg	1960 kg
2. 0,14 cbm Kieszwischenlage	1800 „	252 „
3. 8 qm Asphaltabdeckung	30 „	240 „
4. 1,05 cbm Beton der Fahrstrafse . .	2100 „	2205 „
5. 4,6 qm Gufsasphalt der Fufswege .	40 „	184 „
6. 0,3 cbm Beton der Fufswege . . .	2200 „	660 „
7. 2 m Bordsteine	125 „	256 „
8. Eisen der Fahrbahn (einschl. Geländer)		2077 „
9. Eisen der beiden Hauptträger . . .		2660 „
10. Eisen des oberen Windverbandes .		123 „
11. Eisen des unteren Windverbandes .		237 „
	Zusammen	10854 kg.

Windkräfte. Als Belastung in wagerechter Richtung ist ein Winddruck von 250 kg/qm für die unbelastete, und von 150 kg/qm für die belastete Brücke angenommen; dabei sind die senkrechten Flächen beider Hauptträger und ein Verkehrsband von 3 m Höhe in Ansatz gebracht.

(Schlufs folgt.)

Ueber Bogenbrücken mit elastischen Pfeilern (Bogenreihen).

Bogenbrücken mit mehreren Oeffnungen und schlanken, elastischen Zwischenpfeilern weisen gröfsere Formänderungen und dementsprechend ungünstigere Beanspruchungen auf als solche mit nur einer einzigen Oeffnung und festen, starren Widerlagern, indem bei Belastungen, die sich nur über einzelne Oeffnungen erstrecken, die angrenzenden Pfeiler unter dem einseitigen Bogenschub der Verkehrslast ausgebogen und die Spannweiten der belasteten Oeffnungen vergröfsert werden. Diesem Sachverhalt wird bei Ausführung von Bogenreihen vielfach dadurch Rücksicht getragen, dafs man die Abmessungen schätzungsweise gröfser wählt als bei Einzelöffnungen, oder auch dadurch, dafs man schätzungsweise ein bestimmtes Ausbiegen der Pfeiler in Rechnung stellt.

Im folgenden sollen nun die einschlägigen Verhältnisse genauer untersucht und die Aenderungen des Kräfteplans, die bei Bogenreihen mit elastischen Zwischenpfeilern gegenüber Bögen mit starren Pfeilern auftreten, theoretisch festgestellt werden. Es wird hierbei zunächst, wie üblich, bei Aufstellung der statischen und der Formänderungsgleichungen davon abgesehen, dafs streng genommen nicht die planmäfsigen Werthe l und f von Spannweite und Pfeilhöhe, sondern die geänderten, dem endgültigen Gleichgewichtszustand entsprechenden Werthe $l + \triangle l$ und $f + \triangle f$ eingeführt werden müfsten. Dieses Verfahren ist so lange zulässig, als die Aenderungen $\triangle l$ und $\triangle f$ nur geringfügig sind; bei hohen, schlanken Pfeilern können dieselben jedoch, namentlich für Bögen mit drei Gelenken so hohe Werthe erreichen, dafs ihre Vernachlässigung zu völlig unzutreffenden Ergebnissen führen würde. Es wird daher für diese Fälle noch eine zweite, genauere Untersuchung durchgeführt, die der Aenderung der planmäfsigen Werthe von l und f Rechnung trägt. Die entsprechenden Aenderungen des Kräfteplans erstrecken sich nicht nur auf die Gröfsen, sondern auch auf die Angriffspunkte und Hebelarme der einzelnen Kräfte; insbesondere werden hierbei die lothrechten Kräfte in ihrer Einwirkung auf die Beanspruchung und auf die Formänderung der Pfeiler betroffen.

I. Bogen mit drei Gelenken.

a) Die Aenderungen $\triangle l$ und $\triangle f$ von Spannweite und Pfeilhöhe werden vernachlässigt.

Wenn man die infolge der Pfeilerausbiegungen auftretenden Aenderungen von Spannweite und Pfeilhöhe vernachlässigt, also durchweg deren planmäfsigen Werthe l und f in die Rechnung einführt, so erhält man für den Dreigelenkbogen die gleichen Auflagerkräfte wie bei starren Pfeilern;

der Kräfteplan wird durch die Nachgiebigkeit der Pfeiler nicht geändert.

Bei beliebiger Belastung der Brücke wirken auf den Kopf eines Pfeilers die Auflagerkräfte der anstoſsenden Bögen $C'H'$ und $C''H''$, die sich zu einer wagerechten Kraft R, einer lothrechten, in der Pfeilerachse wirkenden Kraft C und einem Drehmoment T zusammensetzen lassen (Abb. 1 u. 2). Auf die Verbiegung des Pfeilers sind nur R und T von Einfluſs. Man erhält für die Verschiebung des Pfeilerkopfes den Betrag

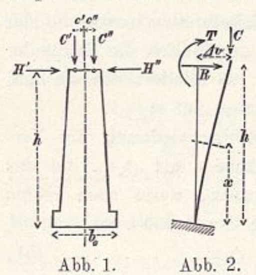


Abb. 1. Abb. 2.

$$\triangle v = \int_0^h \frac{M}{\mathfrak{E}\mathfrak{J}}(h-x)dx + \frac{M_0 h}{\eta \mathfrak{J}_0},$$

$$\left.\begin{aligned}\triangle v &= \int_0^h \frac{R(h-x)^2 + T(h-x)}{\mathfrak{E}\mathfrak{J}}dx + \frac{Rh^2 + 1h}{\eta\mathfrak{J}_0}\\ &= R\left(\int_0^h \frac{(h-x)^2 dx}{\mathfrak{E}\mathfrak{J}} + \frac{h^2}{\eta\mathfrak{J}_0}\right) + T\left(\int_0^h \frac{(h-x)dx}{\mathfrak{E}\mathfrak{J}} + \frac{h}{\eta\mathfrak{J}_0}\right)\end{aligned}\right\} \quad (1)$$

Hierin bezeichnet

$\mathfrak{J}$ das i. a. veränderliche Trägheitsmoment des Pfeilerquerschnitts für die Abscisse x.

$\mathfrak{J}_0$ das Trägheitsmoment der Grundfläche.

$\mathfrak{E}$ die Elasticitätsziffer des Pfeilerstoffes. Für Stein ist streng genommen die Gröſse $\mathfrak{E}$ nicht vollkommen unveränderlich, doch kann sie hier innerhalb der Grenzen der Anwendung genau genug als unveränderlich angenommen werden.

η die Bodenziffer, d. h. die Ziffer, die das Verhältniſs zwischen Bodenpressung und zugehöriger Senkung angiebt.

Für unveränderliches $\mathfrak{J}$ bezw. für einen entsprechenden Mittelwerth ergiebt sich

$$\triangle v = R\left(\frac{h^3}{3\mathfrak{E}\mathfrak{J}} + \frac{h^2}{\eta\mathfrak{J}_0}\right) + T\left(\frac{h^2}{2\mathfrak{E}\mathfrak{J}} + \frac{h}{\eta\mathfrak{J}_0}\right) \quad . \quad (2)$$

Am ungünstigsten liegen die Verhältnisse für einen Pfeiler, wenn er sich zwischen einer belasteten und einer unbelasteten Oeffnung befindet. Sind wie gewöhnlich die einzelnen Oeffnungen gleichartig gestaltet, so übt das Eigengewicht der Bögen keine biegende Wirkung auf den Pfeiler aus; eine solche erfolgt nur durch die Verkehrslast. Nimmt man die linksseitige Oeffnung als belastet an (Normalfall), so ist $R = vH$, $T = vC \cdot c$ zu setzen, wo vH den durch die Verkehrslast hervorgerufenen Bogenschub, vC den entsprechenden lothrechten Auflagerdruck, c dessen Hebelarm bezeichnet. Bei vollständiger, gleichmäſsiger Belastung des Bogens mit p für die Längeneinheit, ist

$$vH = \frac{pl^2}{8f},\ vC = \frac{pl}{2} \quad . \ . \ . \ . \ . \quad (3)$$

Die Bodenpressungen in den äuſsersten Punkten der Sohle sind

$$\sigma_1 = \frac{G}{\mathfrak{F}_0} + \frac{M_0 b_0}{\mathfrak{J}_0 2} \text{ und } \sigma_2 = \frac{G}{\mathfrak{F}_0} - \frac{M_0 b_0}{\mathfrak{J}_0 2} \quad . \ . \quad (4)$$

wo $\mathfrak{F}_0$ den Inhalt der Grundfläche und G das gesamte auf ihr lastende Gewicht bezeichnet.

Zahlenbeispiel 1 (Steinbogen von 10 m Stützweite).

Es handle sich um eine gewölbte Straſsenbrücke mit drei Gelenken.

$l = 10$ m $= 1000$ cm, $f = \frac{1}{4}l = 250$ cm, $h = 20$ m $= 2000$ cm, $p = 400$ kg, $g = 2400$ kg auf 1 m Pfeilerbreite,

$b_0 = 3$ m $= 300$ cm, $\mathfrak{J}_0 =$ rund $240\,000\,000$ cm^4 auf 1 m Breite,

$\mathfrak{F}_0 = 30\,000$ cm^2 auf 1 m Breite,

$\mathfrak{J} = \frac{1}{2}\mathfrak{J}_0 = 120\,000\,000$ cm^4, $\mathfrak{E} = 60\,000$ kg/qcm, $\eta = 5$ kg/cm bezw. $= 20$, bezw. $= \infty$,

$G = 124\,000$ kg auf 1 m Breite, $c = 1$ m $= 100$ cm.

$$vH = \frac{pl^2}{8f} = \frac{400 \cdot 10^2}{8 \cdot 2{,}5} = 2000 \text{ kg},\ vC = \frac{pl}{2} = \frac{400 \cdot 10}{2} = 2000 \text{ kg},\ R = vH = 2000 \text{ kg},$$

$T = -vC \cdot c = -2000 \cdot 100 = -200$ kg/cm, alle Kräfte auf 1 m Breite bezogen.

Nach Gleichung (2) ist nun für

$\eta = 5$, $\triangle v = 7{,}00$ cm,

$\eta = 20$, $\triangle v = 2{,}27$ cm,

$\eta = \infty$, $\triangle v = 0{,}68$ cm.

Das Moment bezüglich der Pfeilersohle ist

$$M_0 = Rh + T = 2000 \cdot 2000 - 200\,000 = 3\,800\,000 \text{ kg/cm}.$$

Das Widerstandsmoment $\mathfrak{W}_0 = \frac{\mathfrak{J}_0 2}{b_0} = 1\,600\,000$ cm^3.

Die Randspannungen (positiv für Druck, negativ für Zug)

$$\sigma_1 = \frac{G}{\mathfrak{F}_0} + \frac{M_0}{\mathfrak{W}_0} = \frac{124\,000}{30\,000} + \frac{3\,800\,000}{1\,600\,000} = 4{,}1 + 2{,}4 = 6{,}5 \text{ kg/qcm},$$

$\sigma_2 = 4{,}1 - 2{,}4 = 1{,}7$ kg/qcm.

Aus vorstehenden Zahlenwerthen ist der groſse Einfluſs der Bodenbeschaffenheit auf die Verschiebung des Pfeilerkopfes ersichtlich; er überwiegt in den meisten Fällen den der Pfeilerverbiegung. Leider mangelt es noch vollständig an zuverlässigen Angaben über die Gröſse der Bodenziffer η bei Pfeilerbauten. Es läſst sich nur sagen, daſs η von den Abmessungen der Druckfläche abhängig ist und mit wachsender Druckfläche abnimmt; ferner, daſs es unter sonst gleichen Verhältnissen mit der Gründungstiefe wächst (sieh Centralblatt der Bauverwaltung 1893, S. 306 und 1900, S. 308). Hiernach können die für Eisenbahnoberbau ermittelten Werthe von η, die sich i. a. zwischen 3 und 10 bewegen, nur mit Vorbehalt und entsprechend abgeändert für Pfeilerbauten Anwendung finden. Es dürfte wohl anzunehmen sein, daſs bei gutem Baugrund und angemessener Tiefe die Gröſse η keinen geringeren Werth als 20 aufweist, und daſs bei festem Felsboden $\eta = \infty$ gesetzt werden kann.

Die Gröſse der Elasticitätsziffer $\mathfrak{E}$ von Mauerwerk schwankt je nach Steinart, Mörtelbeschaffenheit und Ausführungsweise in sehr weiten Grenzen. Auf Grund der wenigen hierüber veröffentlichten Angaben kann man als Mittelwerthe annehmen:

für Bruchsteinmauerwerk aus Sandstein $\mathfrak{E} = 60\,000$ kg/qcm,

für Ziegelmauerwerk $\mathfrak{E} = 30\,000$ kg/qcm,

für Betonmauerwerk $\mathfrak{E} = 250\,000$ kg/qcm.

Diese Verschiedenheiten von $\mathfrak{E}$ kommen nur bei unpreſsbarem Boden hinsichtlich der Pfeilerausbiegung $\triangle v$ voll zum Ausdruck; je preſsbarer der Boden, desto mehr treten sie hinter dem Einfluſs der Bodenziffer η zurück.

b) Die Aenderungen $\triangle l$ und $\triangle f$ von Spannweite und Pfeilhöhe werden berücksichtigt.

Wenn man, den thatsächlichen Verhältnissen entsprechend, die Aenderungen $\triangle l$ und $\triangle f$ in Rechnung stellt, so treten bei Belastung von nur einer Oeffnung durch die Verkehrs-

last Verbiegungen sämtlicher Pfeiler und somit Aenderungen des Kräftespiels in sämtlichen Oeffnungen auf, während sich bei der üblichen, unter a) angegebenen Näherungsrechnung die Aenderung auf die belastete Oeffnung und deren zwei Nachbarpfeiler beschränkt. Die Ausbiegungen und Beanspruchungen der Nachbarpfeiler fallen gröſser aus als unter a) berechnet, die ausbiegende Kraft R wird gröſser als der von der Verkehrslast herrührende Bogenschub vH bei starren Pfeilern. Die weiter folgenden Pfeiler erhalten abwechselnd negative und positive Ausbiegungen, die anderen Oeffnungen werden abwechselnd kleiner und gröſser als normal (Abb. 3), wobei jedoch die Absolutwerthe der Ab-

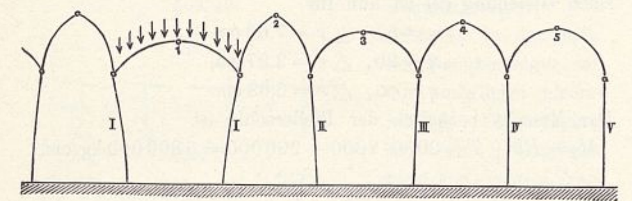


Abb. 3.

weichungen immer kleiner und kleiner ausfallen. Infolge des Ausbiegens der Pfeiler I sinkt nämlich nicht nur der Scheitel 1, sondern hebt sich auch der benachbarte Scheitel 2; die Spannweite l_2 wird kleiner, ihre Pfeilhöhe f_2 gröſser als normal, somit auch der Bogenschub dieser Oeffnung kleiner als normal. Er ist nun nicht mehr imstande, den Schub der Oeffnung 3 aufzuheben, der Pfeiler II muſs sich daher nach links ausbiegen, wodurch l_3 gröſser, f_3 kleiner und H_3 gröſser als normal werden. Dies hat nun eine Ausbiegung des Pfeilers III nach rechts zur Folge u. s. f.

Es verdient bemerkt zu werden, daſs bei hängenden Dreigelenkbogen die Formänderungen in anderer Weise (Abb. 4)

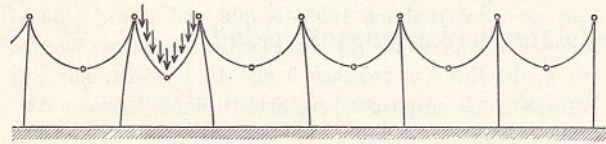


Abb. 4.

vor sich gehen. Hier verringert sich nur bei der belasteten Oeffnung die Spannweite, bei allen anderen, den unbelasteten, wird sie gröſser; sämtliche Pfeiler neigen sich nach der belasteten Oeffnung hin. Der Bogenzug der belasteten Oeffnung wird kleiner, als wenn die Pfeiler starr wären; er mindert sich in dem Maſse, in dem sich die elastischen Pfeiler nach innen neigen. Im Gegensatz hierzu wächst bei den Druckbögen der Bogenschub mit der Pfeilerbiegung, was ein weiteres Ausbiegen der Pfeiler zur Folge hat u. s. f. Im Grenzfall, bei zu schlanken Pfeilern, ist dieses Wachsthum unbegrenzt, die Pfeiler knicken um, das Bauwerk wird zerstört — ein vollständiges Gegenstück zum Ausknicken eines über das zulässige Maſs belasteten Druckstabes. Es ist Sache des Baumeisters, die Pfeiler so kräftig auszuführen, daſs sie dem Grenzfall des Ausknickens gegenüber ausreichende Sicherheit bieten.

Um nun die vorliegende Aufgabe zu lösen, betrachte man die Pfeilerausbiegungen $\triangle v$ als Unbekannte und drücke alle anderen Gröſsen (die Aenderungen $\triangle l$ und $\triangle f$ von Spannweite und Pfeilhöhe, die neuen Bogenschübe $\mathfrak{H}$ und die Pfeilergegenkräfte R) als Functionen derselben aus. Das Gleichgewicht der am Pfeilerkopf wirkenden wagerechten Kräfte liefert sodann die zur Bestimmung der Unbekannten $\triangle v$ erforderlichen Gleichungen. Bei n Oeffnungen und $n+1$ Pfeilern ist die Zahl der Unbekannten sowie die der Gleichungen $= n+1$. Wenn wie gewöhnlich die Endpfeiler als starr angesehen werden können, so mindert sich die Zahl der Gleichungen und der Unbekannten auf $n-1$.

Bezeichnet man für eine beliebige Oeffnung die Verschiebung des linksseitigen Pfeilerkopfes mit $\triangle v'$, die des rechtsseitigen mit $\triangle v''$ (beide positiv, wenn nach rechts gerichtet), so ist die Vergröſserung der Spannweite

$$\triangle l = \triangle v'' - \triangle v' \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (5)$$

die zugehörige Vergröſserung der Pfeilhöhe ist

$$\triangle f = -\frac{l \triangle l}{4f} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (6)$$

Abb. 5.

wie aus der Bedingung, $f^2 + \frac{l^2}{4} = s^2 =$ annähernd unveränderlich, unmittelbar hervorgeht (Abb. 5).

Der den geänderten Grundmaſsen entsprechende Bogenschub kann näherungsweise gesetzt werden

$$\left.\begin{aligned} \mathfrak{H} &= H\,\frac{l+\triangle l}{l} : \frac{f+\triangle f}{f} = H\left(1+\frac{\triangle l}{l}\right)\left(1-\frac{\triangle f}{f}\right) \\ &= H\left[1+\triangle l\left(\frac{1}{l}+\frac{l}{4f^2}\right)\right] \\ &= H\left[1+(\triangle v''-\triangle v')\left(\frac{1}{l}+\frac{l}{4f^2}\right)\right] \\ &= H\left[1+\frac{(\triangle v''-\triangle v')}{l}\,\frac{s^2}{f^2}\right] \end{aligned}\right\} (7)$$

wo H den normalen Schub bei starren Pfeilern bezeichnet. Für eine unbelastete Oeffnung ist $H = eH = \frac{gl^2}{8f}$, für eine gleichmäſsig durch die Verkehrslast p belastete, $H = eH + vH = \frac{(g+p)\,l^2}{8f}$.

Auf den Kopf des r. Pfeilers, der sich zwischen der r. und $(r-1)$. Oeffnung befindet, wirken nun, wie in Abb. 6 dargestellt, die wagerechten Bogenschübe $\mathfrak{H}_{r-1}$ und $\mathfrak{H}_r$, die lothrechten Bogendrücke C_{r-1} und C_r und das Gewicht des Pfeileraufsatzes P_0. Diese Kräfte lassen sich, wie in Abb. 7 angegeben, ersetzen durch eine wagerechte Kraft

$$R = \mathfrak{H}_{r-1} - \mathfrak{H}_r \quad . \quad (8)$$

durch eine lothrechte centrische Kraft

$$P = C_{r-1} + C_r + P_0 \quad (9)$$

Abb. 6. Abb. 7.

und durch ein Moment

$$\left.\begin{aligned} \mathfrak{M} &= (-C_{r-1} + C_r)\,c + (\mathfrak{H}_{r-1} + \mathfrak{H}_r)\,c \cdot \triangle\varphi \\ &= T + (\mathfrak{H}_{r-1} + \mathfrak{H}_r)\,\frac{cz\triangle v}{h} \end{aligned}\right\} (10)$$

wo $\triangle\varphi$ den Verbiegungswinkel am Pfeilerkopf bezeichnet. $\triangle\varphi$ ist bei unpreſsbarem Boden annähernd gleich $\frac{2\triangle v}{h}$, bei sehr preſsbarem Boden bezw. bei starrem Pfeiler gleich $\frac{\triangle v}{h}$ und wurde i. a. gleich $\frac{z \cdot \triangle v}{h}$ gesetzt, wo z zwischen 1 und 2 liegt.

Bei dem sehr geringen Einfluſs, den das fragliche Glied auf das Endergebniſs ausübt, genügt es, im Einzelfall die Gröſse von z schätzungsweise anzunehmen.

Die Verschiebung des Pfeilerkopfes durch die wagerechte Kraft R ist gleich $\frac{R}{\varrho}$, wenn man den Factor von R in Gl. (1) bezw. Gl. (2) mit $\frac{1}{\varrho}$ bezeichnet, d. h.

$$\frac{1}{\varrho}=\int_0^h\frac{(h-x)^2dx}{\mathfrak{E}\mathfrak{J}}+\frac{h^2}{\eta\mathfrak{J}_0}\text{ bezw. }=\frac{h^3}{3\mathfrak{E}\mathfrak{J}}+\frac{h^2}{\eta\mathfrak{J}_0}\quad(11)$$

In gleicher Weise erhält man die Verschiebung durch das Moment $\mathfrak{M}$ gleich $\frac{\mathfrak{M}}{\tau}$, wo $\frac{1}{\tau}$ den Factor von T in Gl. (1) bezw. Gl. (2) bezeichnet, d. h.

$$\frac{1}{\tau}=\int_0^h\frac{(h-x)dx}{\mathfrak{E}\mathfrak{J}}+\frac{h}{\eta\mathfrak{J}_0}\text{ bezw. }=\frac{h^2}{2\mathfrak{E}\mathfrak{J}}+\frac{h}{\eta\mathfrak{J}_0}\quad(12)$$

Die Gröſsen $\frac{1}{\varrho}$ und $\frac{1}{\tau}$ bedeuten nach vorstehendem diejenigen Verschiebungen des Pfeilerkopfes, welche durch $R=1$ bezw. $\mathfrak{M}=1$ hervorgerufen werden. Die reciproken Werthe ϱ und τ bedeuten diejenige wagerechte Kraft bezw. dasjenige Moment, welche einer Verschiebung $\triangle v=1$ entsprechen.

Die Verschiebung, welche die um $\triangle v$ aus der ursprünglichen Lage gebrachte lothrechte Last P hervorruft, ist gleich

$$\int_0^h\frac{P(\triangle v-y)(h-x)dx}{\mathfrak{E}\mathfrak{J}}+\frac{P\triangle v\cdot h}{\eta\mathfrak{J}_0},\text{ abgekürzt }=\frac{P\triangle v}{\pi}\quad(13)$$

y bezeichnet hierbei die Ordinate der elastischen Linie der Pfeilerachse.

Für sehr preſsbaren Boden und einen kräftigen Pfeiler mit groſsem $\mathfrak{E}$ ist die elastische Linie nahezu eine Gerade, $y=\frac{\triangle v\cdot x}{h}$. Für diesen Fall wird, wenn $\mathfrak{J}$ unveränderlich,

$$\frac{1}{\pi}=\left(\frac{h^2}{3\mathfrak{E}\mathfrak{J}}+\frac{h}{\eta\mathfrak{J}_0}\right)\text{ bezw. }=\frac{h}{\eta\mathfrak{J}_0}\text{ für }\mathfrak{E}=\infty\quad(13^a)$$

Für unpreſsbaren Boden kann näherungsweise, dem Parabelgesetz entsprechend, $y=\triangle v\cdot\frac{x^2}{h^2}$ gesetzt werden. Man erhält sodann bei unveränderlichem $\mathfrak{J}$

$$\frac{1}{\pi}=\left(\frac{5h^2}{12\mathfrak{E}\mathfrak{J}}+\frac{h}{\eta\mathfrak{J}_0}\right)\text{ bezw. }=\frac{5h^2}{12\mathfrak{E}\mathfrak{J}}\text{ für }\eta=\infty\quad(13^b)$$

Der Unterschied beider Grenzwerthe von $\frac{1}{\pi}$ ist nur gering. Im Einzelfall ist für $\frac{1}{\pi}$ schätzungsweise ein Zwischenwerth anzunehmen.

In ähnlicher Weise wie das am Pfeilerkopf wirkende lothrechte Gewicht P bringt auch das unterhalb gelegene Pfeilergewicht Q eine Vermehrung der Pfeilerausbiegung zustande. Bezeichnet man das Gewicht für die Höheneinheit des Pfeilers mit q, so ist für einen Querschnitt x das entsprechende Biegungsmoment

$$M=\int_x^h qydx-y\int_x^h qdx;\text{ für }x=0,\ M_0=\int_0^h qydx\quad(14)$$

und für die beiden Grenzfälle einer geraden und einer parabelförmigen elastischen Linie bei unveränderlichem q

$$M=\frac{q(h-x)^2}{2h}\triangle v,\ M_0=\frac{qh}{3}\triangle v\quad .\ .\ (14^a)$$

$$\text{und }M=\frac{q(h^3-3hx^2+2x^3)}{3h^2}\triangle v,\ M_0=\frac{qh}{2}\triangle v\quad(14^b)$$

Infolge der Momente M biegt sich die Pfeilerkrone aus um

$$\int_0^h\frac{M(h-x)dx}{\mathfrak{E}\mathfrak{J}}+\frac{M_0h}{\eta\mathfrak{J}_0}\quad .\ .\ .\ .\ (15)$$

und in den beiden Grenzfällen um

$$\frac{qh^3\triangle v}{8\mathfrak{E}\mathfrak{J}}+\frac{qh^2\triangle v}{2\eta\mathfrak{J}_0}\text{ oder }Q\triangle v\left(\frac{h^2}{8\mathfrak{E}\mathfrak{J}}+\frac{h}{2\eta\mathfrak{J}_0}\right),\text{ da }Q=qh,$$

$$\text{und um }\frac{7qh^3\triangle v}{60\mathfrak{E}\mathfrak{J}}+\frac{qh^3\triangle v}{3\eta\mathfrak{J}_0}\text{ oder }Q\triangle v\left(\frac{7h^2}{60\mathfrak{E}\mathfrak{J}}+\frac{h}{3\eta\mathfrak{J}_0}\right).$$

Abgekürzt kann man die durch Q hervorgerufene Ausbiegung setzen $=\frac{Q}{\psi}\triangle v$, wo $\frac{1}{\psi}$ im Einzelfall schätzungsweise zwischen den Grenzwerthen

$$\frac{1}{\psi}=\left(\frac{h^2}{8\mathfrak{E}\mathfrak{J}}+\frac{h}{2\eta\mathfrak{J}_0}\right)\quad .\ .\ .\ .\ (15^a)$$

$$\text{und }\frac{1}{\psi}=\left(\frac{7h^2}{60\mathfrak{E}\mathfrak{J}}+\frac{h}{3\eta\mathfrak{J}_0}\right)\quad .\ .\ .\ .\ (15^b)$$

zu wählen ist.

Man hat nun die gesamte Ausbiegung des r. Pfeilers

$$\triangle v_r=\frac{R}{\varrho}+\frac{\mathfrak{M}}{\tau}+\frac{P}{\pi}\triangle v_r+\frac{Q}{\psi}\triangle v_r\quad .\ .\ (16)$$

Nach Gl. (8) und (7) ist

$$\left.\begin{aligned}R_r=\mathfrak{H}_{r-1}-\mathfrak{H}_r=H_{r-1}\left[1+\frac{(\triangle v_r-\triangle v_{r-1})s_{r-1}^2}{l_{r-1}f_{r-1}^2}\right]\\-H_r\left[1+\frac{(\triangle v_{r+1}-\triangle v_r)s_r^2}{l_rf_r^2}\right]\end{aligned}\right\}\quad(17)$$

nach Gl. (10)

$$\left.\begin{aligned}\mathfrak{M}_r&=T_r+(\mathfrak{H}_{r-1}+\mathfrak{H}_r)\frac{cz\triangle v_r}{h}\\\text{angenähert }&=T_r+(H_{r-1}+H_r)\frac{cz\triangle v_r}{h}\end{aligned}\right\}\quad(18)$$

wenn man die kleinen Gröſsen zweiter Ordnung $\triangle v^2$ vernachlässigt.

Der Einfachheit wegen wurde bei den auf den r. Pfeiler bezüglichen Gröſsen P, Q, h und c der Index r weggelassen, da hier eine Verwechslung nicht zu befürchten ist.

Nach Einsetzen dieser Werthe in Gl. (16) erhält man die gesuchte Grundgleichung für den r. Pfeiler

$$\left.\begin{aligned}&\triangle v_r\left[1-\frac{H_{r-1}}{\varrho}\left(\frac{s_{r-1}^2}{l_{r-1}f_{r-1}^2}+\frac{cz}{\tau h}\right)-\frac{H_r}{\varrho}\left(\frac{s_r^2}{l_rf_r^2}+\frac{cz}{\tau h}\right)\right.\\&\left.-\frac{P}{\pi}-\frac{Q}{\psi}\right]+\triangle v_{r-1}\frac{H_{r-1}s_{r-1}^2}{\varrho l_{r-1}f_{r-1}^2}+\triangle v_{r+1}\frac{H_rs_r^2}{\varrho l_rf_r^2}\\&=\frac{H_{r-1}-H_r}{\varrho}+\frac{T_r}{\tau}\end{aligned}\right\}(19)$$

Die Werthe ϱ, τ, π, ψ beziehen sich hierbei auf den r. Pfeiler.

Wenn alle Oeffnungen gleichartig sind, so erhält Gl. (19) folgende einfachere Form:

$$\left.\begin{aligned}&\triangle v_r\left[1-(H_{r-1}+H_r)\left(\frac{s^2}{\varrho lf^2}+\frac{cz}{\tau l}\right)-\frac{P}{\pi}-\frac{Q}{\psi}\right]\\&+\triangle v_{r-1}\frac{H_{r-1}s^2}{\varrho lf^2}+\triangle v_r\frac{H_rs^2}{\varrho lf^2}=\frac{H_{r-1}-H_r}{\varrho}+\frac{T_r}{\tau}\end{aligned}\right\}(19^a)$$

da l, s und f für alle Oeffnungen die gleichen Werthe besitzen.

Gl. (19) bezw. (19^a), $n-1$ mal aufgestellt, ermöglicht die $n-1$ unbekannten $\triangle v$ und sodann mit Hülfe der Gleichungen (7), (17), (18) die Gröſsen H, R und $\mathfrak{M}$ zu bestimmen. Die in den Gl. (19) und (19^a) enthaltenen Glieder mit dem Beiwerth z sind nur von geringer Bedeutung und können bei Zahlenrechnungen vernachlässigt werden.

Ein Näherungsverfahren, bei welchem jeweils nur zwei Gleichungen mit zwei Unbekannten auftreten, besteht darin, daß man immer nur drei Oeffnungen, eine belastete und die zwei benachbarten, unbelasteten in Betracht zieht und die Ausbiegungen der zwei äußeren Pfeiler, etwas zu günstig, gleich Null annimmt. Die Ausbiegungen der zwei inneren, an die belastete Oeffnung anstoßenden Pfeiler sind i. a. verschieden groß, gleich $\triangle v'$ und $\triangle v''$, und verschiedenen Vorzeichens. Bei gleichartigen Verhältnissen verlangt die Symmetrie, daß $\triangle v' = -\triangle v''$; man kommt dann mit einer einzigen Gleichung (19ᵃ) zur Bestimmung der einzigen Unbekannten $\triangle v$ aus.

Die gemachte Annahme ist bei dem in Abb. 8 (S. 324) dargestellten Falle vollständig erfüllt. Es handelt sich hier um drei gleichartige Oeffnungen mit starren Endpfeilern, deren mittlere durch die Verkehrslast belastet ist.

Wendet man die Grundgleichung (19ᵃ) auf Pfeiler 3 an, so ist zu setzen

$$r=3,\ \triangle v_r = \triangle v,\ \triangle v_{r-1} = -\triangle v,\ \triangle v_{r+1} = 0,$$

$$H_{r-1} = H_2 = eH + vH = \frac{(g+p)\,l^2}{8f},\ H_r = H_3 = eH = \frac{gl^2}{8f};$$

$$T_r = -vC\cdot c = -\frac{pl}{2}c;\ P = P_0 + 2eC + vC = P_0 + gl + \frac{pl}{2}.$$

Die Gleichung geht sodann über in

$$\left.\begin{aligned}&\triangle v\left[1 - \frac{(3eH+2vH)\,s^2}{\varrho l f^2} - \frac{(2eH+vH)\,cx}{\tau l} - \frac{P_0 + 2eC + vC}{\pi} - \frac{Q}{\psi}\right] = \frac{vH}{\varrho} - \frac{vC\cdot c}{\tau}\\ &\text{oder } \triangle v = \left(\frac{vH}{\varrho} - \frac{vC\cdot c}{\tau}\right)\frac{1}{1-Z}\end{aligned}\right\}\ (20)$$

$$\left.\begin{aligned}\text{wo } Z = &\frac{(3eH+2vH)\,s^2}{\varrho l f^2} + \frac{(2eH+vH)\,cx}{\tau l}\\ &+ \frac{P_0 + 2eC + vC}{\pi} + \frac{Q}{\psi}\end{aligned}\right\}\ (21)$$

Aus dem Vergleich der Formel (20) mit der früher unter a) entwickelten Formel (2) geht hervor, daß die Ausbiegung bei schärferer Rechnung sich $\frac{1}{1-Z}$ mal größer ergiebt als dort angegeben.

Den Werth von R erhält man mit Hülfe der Gl. (17) zu

$$\left.\begin{aligned}R &= vH + (3eH + 2vH)\frac{s^2}{lf^2}\left(\frac{vH}{\varrho} - \frac{vC\cdot c}{\tau}\right)\frac{1}{1-Z}\\ &= vH\,\frac{\left[1 - \frac{(2eH+vH)\,cx}{\tau l} - \frac{(P_0 + 2eC + vC)}{\pi} - \frac{Q}{\psi}\right] - \frac{vC\cdot c}{\tau}(3eH+2vH)\frac{s^2}{lf^2}}{1-Z}\end{aligned}\right\}\ (22)$$

Dieser Werth ist größer als der für starre Pfeiler gültige $R = vH$.

R wird unendlich, d. h. ein Ausknicken der Pfeiler tritt ein für $Z = 1$. Vernachlässigt man die minder wichtigen Glieder, so heißt das

$$\frac{(3eH+2vH)s^2}{\varrho l f^2} + \frac{P_0 + 2eC + vC}{\pi} + \frac{Q}{\psi} = 1.$$

Der Grenzzustand des Gleichgewichts tritt ein, wenn schon für $vH = 0$ die Größe $Z = 1$ wird, also für

$$\frac{3eHs^2}{\varrho l f^2} + \frac{2eC}{\pi} + \frac{P_0}{\pi} + \frac{Q}{\psi} = 1\quad .\ .\quad (23)$$

Aus dieser Formel lassen sich verschiedene Sonderformeln ableiten.

Für $eH = eC = Q = 0$, d. h. für einen Pfeiler, der nur durch eine an seiner Krone angreifende lothrechte Last P_0 belastet ist, wird $\frac{P_0}{\pi} = 1$ oder $P_0 = \pi$, wo π den in Gl. (13ᵃ) oder (13ᵇ) angegebenen Werth besitzt.

Für unpreßbaren Boden wird $P_0 = \pi = \frac{2{,}4\,\mathfrak{E}\mathfrak{J}}{h^2}$, was fast vollständig mit der entsprechenden Eulerschen Formel

$$P_0 = \frac{2{,}467\,\mathfrak{E}\mathfrak{J}}{h^2}$$

übereinstimmt. Die geringe Verschiedenheit rührt davon her, daß als elastische Linie näherungsweise eine Parabel statt der wirklichen Cosinuslinie eingeführt wurde.

Setzt man nach Gl. (13ᵃ) $\frac{1}{\pi} = \frac{h}{\eta\,\mathfrak{J}_0}$, was einen starren Pfeiler bei preßbarem Untergrund voraussetzt, so erhält man als Knickbelastung $P_0 = \pi = \frac{\eta\,\mathfrak{J}_0}{h}$. Wirkt auf den Pfeiler nur sein eigenes Gewicht Q, so ist die Bedingung für das Ausknicken $\frac{Q}{\psi} = 1$ oder $Q = \psi$.

Für unpreßbaren Boden wird dann das Knickgewicht $Q = \frac{60\,\mathfrak{E}\mathfrak{J}}{7h}$, für starre Pfeiler und preßbaren Untergrund $Q = \frac{2\,\eta\,\mathfrak{J}_0}{h}$.

Der letztere Fall ist im Grundsatz der gleiche, wie der beim Kentern eines Schiffes wegen zu hoher Schwerpunktslage eintretende, wenn auch dort wegen der besonderen Schiffsform und des seitlichen Wasserdruckes die betreffende Formel eine etwas andere Gestalt erhält.

Für $P_0 = 0$ und $Q = 0$ erhält man als Bedingung für die Knickwirkung der Bogenkräfte eH und eC für sich allein

$$\frac{3eHs^2}{\varrho l f^2} + \frac{2eC}{\pi};$$

nach Einsetzen der Werthe von eH und eC ergiebt sich das entsprechende Eigengewicht der Oeffnung zu

$$gl = 1 : \left(\frac{3s^2}{8\varrho f^3} + \frac{1}{\pi}\right) = \frac{8f^3\varrho\pi}{3s^2\pi + 8\varrho f^2}.$$

Für unpreßbaren Boden ist

$$\varrho = \frac{3\,\mathfrak{E}\mathfrak{J}}{h^3},\ \pi = \frac{12\,\mathfrak{E}\mathfrak{J}}{5h^2},$$

somit

$$gl = \frac{\mathfrak{E}\mathfrak{J}}{h^2} : \left(\frac{hs^2}{8f^3} + \frac{5}{12}\right).$$

Wenn das Eigengewicht wie bei einem Balkenträger nur lothrecht drückend, nicht aber wagerecht schiebend auf den Pfeiler einwirkte, so wäre nach dem Früheren das knickende Gewicht $gl = \frac{2{,}4\,\mathfrak{E}\mathfrak{J}}{h^2} = \frac{\mathfrak{E}\mathfrak{J}}{h^2} : \frac{5}{12}$, also

$$\left(\frac{hs^2}{8f^3} + \frac{5}{12}\right) : \frac{5}{12} \text{ oder } \left(\frac{0{,}3\,hs^2}{f^3} + 1\right) \text{ mal größer.}$$

Infolge der Bogenwirkung übt demnach das Eigengewicht einen $\left(\frac{0{,}3\,hs^2}{f^3} + 1\right)$ mal ungünstigeren Einfluß bezüglich des Ausknickens aus.

Kehren wir nun wieder zu der Gl. (22) zurück und untersuchen, in welcher Weise die wagerecht auf den Pfeiler-

kopf wirkende Kraft R von den einzelnen Factoren abhängt. Scheidet man zu diesem Zwecke, um durchsichtige Formeln zu erhalten, die weniger wichtigen Factoren aus, so erhält man

$$\left.\begin{aligned} R = vH: \left[1 - \frac{(3\,eH + 2\,vH)\,s^2}{\varrho\,l f^2}\right] = vH \frac{1}{1-Z} \\ = vH: \left[1 - \frac{(1{,}5\,g + p)\,l s^2 h^3}{\mathfrak{E} f^3 b^3}\right] \end{aligned}\right\} \quad (24)$$

wenn man unpreſsbaren Untergrund voraussetzt und unter g und p die Brückenbelastungen auf die Längeneinheit des Pfeilers bezogen versteht.

Es ist hieraus ersichtlich, daſs der Beiwerth $\frac{1}{1-Z}$, welcher anzeigt, wieviel mal die Schubkraft R bei elastischen Pfeilern gröſser ist als bei starren, zunimmt mit den Belastungen und zwar hauptsächlich mit der Eigenlast g, mit der Schlankheit des Pfeilers in der dritten Potenz $\left(\frac{h}{b}\right)^3$, und annähernd mit der dritten Potenz der Bogenflachheit $\left(\frac{l}{f}\right)^3$, insofern näherungsweise $s = \frac{l}{2}$ gesetzt werden kann. Die Spannweite l ist bei gleichbleibender Eigenlast g und Pfeilerbreite b ohne Einfluſs auf den Beiwerth. Da nun in Wirklichkeit, mit wachsender Spannweite, g und b wachsen, deren Einfluſs aber entgegengesetzter Art ist, so hängt es von den besonderen Verhältnissen ab, welcher Einfluſs überwiegt. In der Regel wird das Wachsthum der Pfeilerbreite den Ausschlag geben und den Werth von $\frac{1}{1-Z}$ herabmindern, sodaſs hiernach groſse Spannweiten unter sonst gleichen Verhältnissen $\left(\text{gleiches } \frac{f}{l} \text{ und } h\right)$ günstiger sind als kleine.

Zahlenbeispiel 2 (drei Steinbögen von 10 m Stützweite).

Behält man die im Beispiel (1) angegebenen Grundwerthe bei und setzt ferner $P_0 = 10\,000$ kg auf 1 m Breite, $Q = 88\,000$ kg auf 1 m Breite, $vC = 2000$ kg, $vH = 2000$ kg, $eC = \frac{gl}{2} = 12\,000$ kg, $eH = \frac{gl^2}{8f} = 12\,000$ kg, $s^2 = \frac{l^2}{4} + f^2 = 31{,}25$ m², so erhält man mit $\mathfrak{E} = 60\,000$ kg/qcm und

		η =	5	20	∞	
die Beiwerthe	ϱ	=	270	830	2700	kg/cm
	τ	=	510 000	1 440 000	3 600 000	kg
	π	=	540 000	1 660 000	4 300 000	„
	ψ	=	1 100 000	3 600 000	7 700 000	„

für $\eta = \infty$ wird $R = 2000 + 150 = 2150$ kg $= 1{,}075 \cdot 2000 = 1{,}075\ vH$,

$M_0 = Rh - vC \cdot c$, mit Vernachlässigung kleinerer Gröſsen höherer Ordnung, $= 4\,100\,000$ kg/cm.

Die Spannungen der beiden äuſsersten Punkte der Grundfläche ergeben sich zu

$$\sigma_1 = \frac{P_0 + 2\,eC + vC}{\mathfrak{F}_0} + \frac{M_0}{\mathfrak{W}_0} = 4{,}1 + 2{,}6 = 6{,}7 \text{ kg/qcm},$$

$$\sigma_2 = 4{,}1 - 2{,}6 = 1{,}5 \text{ kg/qcm},$$

gegen 6,5 und 1,7 kg/qcm bei starren Pfeilern;

für $\eta = 20$ wird $R = 2000 + 640 = 2640 = 1{,}32 \cdot 2000 = 1{,}32\,vH$,

$M_0 = 5\,080\,000$ kg/cm,

$\sigma_1 = 4{,}1 + 3{,}2 = 7{,}3$ kg/qcm,

$\sigma_2 = 4{,}1 - 3{,}2 = 0{,}9$ kg/qcm;

für $\eta = 5$ wird $R = 2000 + 13\,000 = 15\,000 = 7{,}5 \cdot 2000 = 7{,}5\ vH$,

$M_0 = 29\,800\,000$ kg/cm,

$\sigma_1 = 4{,}1 + 18{,}6 = 22{,}7$ kg/qcm,

$\sigma_2 = 4{,}1 - 18{,}6 = -14{,}5$ kg/qcm.

Die letzten Ergebnisse sind nur gedachte; sie würden nur eintreten, wenn an der Grundfläche Zugspannungen auftreten könnten. In Wirklichkeit hebt sich ein Theil des Pfeilers vom Boden ab, die Druckvertheilung an der Sohle und dementsprechend die Formänderungen werden noch ungünstiger, die Schubkraft R erhält einen noch gröſseren Werth als 15 000 kg.

Bei einem Pfeilverhältniſs des Bogens $= 0{,}15$, statt wie bisher angenommen $= 0{,}25$, ergiebt sich, mit $\mathfrak{E} = 60\,000$ und $\eta = \infty$:

$eH = 20\,000$ kg, $vH = 3300$ kg, $s^2 = 27{,}5$,

$R = 3300 + 1170 = 4470 = 1{,}35 \cdot 3300 = 1{,}35\ vH$,

$M_0 = 8\,740\,000$ kg/cm,

$\sigma_1 = 4{,}1 + 5{,}5 = 9{,}6$ kg/qcm, $\sigma_2 = 4{,}1 - 5{,}5 = -1{,}1$ kg/qcm,

d. h. der Pfeiler hebt sich an der inneren Seite vom Boden ab.

Bei starren Pfeilern, wo $R = vH = 3300$ kg, hätte man erhalten:

$M_0 = 6\,400\,000$ kg/cm, $\sigma_1 = 4{,}1 + 4 = 8{,}1$ kg/qcm,

$\sigma_2 = 4{,}1 - 4 = 0{,}1$ kg/qcm.

Unter Berücksichtigung der thatsächlich vorhandenen Nachgiebigkeit wird somit der Kräfteplan wesentlich ungünstiger. Die Pressung σ_2 wird negativ, der Pfeiler erweist sich als zu schwach.

Die Beanspruchungen des Bogens werden durch die Nachgiebigkeit der Pfeiler weit weniger erhöht als die der Pfeiler. Sie wachsen annähernd im Verhältniſs $\mathfrak{H} : H$, d. h. sie werden etwa

$$1 + \frac{\triangle v'' - \triangle v'}{l} \cdot \frac{s^2}{f^2} \text{ bezw. } 1 + \frac{2 \triangle v}{l} \cdot \frac{s^2}{f^2} \text{ mal gröſser.}$$

Beispielsweise beträgt die Vergröſserungsziffer w für $\mathfrak{E} = 60\,000$, $f = 2{,}5$ m und

$\eta = \infty$, $w = 1{,}0075$,

$\eta = 20$, $w = 1{,}032$,

$\eta = 5$, $w = 1{,}648$.

In den beiden ersten Fällen ist sie ohne praktische Bedeutung; im letzteren Falle, der in der Anwendung kaum vorkommen dürfte, beträgt das Wachsthum immerhin nur 65 v. H. gegenüber einem Wachsthum der Pfeilerschubkraft R auf das 7,5 fache, also um 650 v. H.

Das vorstehende Zahlenbeispiel zeigt, daſs bei hohen, schlanken Pfeilern die gewöhnlich vernachlässigten Ausbiegungen von wesentlichem Einfluſs auf das Kräftespiel sein können, und daſs insbesondere bei kleinen Pfeilverhältnissen und preſsbarem Boden groſse Mehrbeanspruchungen der Pfeiler auftreten.

II. Bogen mit zwei Kämpfergelenken.

a) Die Aenderungen $\triangle l$ und $\triangle f$ von Spannweite und Pfeilhöhe werden vernachlässigt.

Wenn eine der Oeffnungen durch die Verkehrslast belastet wird, so biegen sich sämtliche Pfeiler nach auſsen, die belastete Oeffnung vergröſsert sich, während alle übrigen unbelasteten zusammengedrückt werden. Infolge hiervon nimmt der Bogenschub der belasteten Oeffnung, deren Wider-

lager ausweichen, entsprechend ab, der der unbelasteten Oeffnungen jedoch zu, da sie der Zusammendrückung Widerstand entgegensetzen. Die auf die Köpfe der an die belastete Oeffnung anstoſsenden Pfeiler wirkenden Schubkräfte fallen demgemäſs geringer aus als bei starren Pfeilern, d. h. geringer als der der Verkehrslast entsprechende Bogenschub vH. Die Pfeiler werden infolge ihrer Nachgiebigkeit schwächer beansprucht, sie werden entlastet, im Gegensatz zu dem unter Ib betrachteten Verhalten bei Dreigelenkbögen. Mit dieser Entlastung der Pfeiler zeigt sich aber gleichzeitig eine namhafte Mehrbeanspruchung der Bögen; entsprechend der Minderung des Bogenschubs wird nicht mehr die ganze Last durch die „Bogenwirkung" auf die Pfeiler übertragen; ein Theil der Last muſs nunmehr, wie bei einem Balkenträger, durch reine Biegungsspannungen übertragen werden („Balkenwirkung").

Führt man die $n+1$ Ausbiegungen $\triangle v$ der Pfeilerköpfe als Unbekannte ein, bezw. $n-1$ bei starren Endpfeilern, so lassen sich bei beliebiger Belastung der einzelnen Oeffnungen sowohl die Pfeilergegenkräfte R als auch die Aenderungen der Bogenschübe $\triangle H$ als Functionen derselben ausdrücken. Zu ihrer Bestimmung dienen die $n+1$ bezw. $n-1$ Gleichungen für das Gleichgewicht der an den Pfeilerköpfen wirkenden Kräfte.

Die Pfeilerausbiegung ist nach dem Früheren (Gl. 1 bezw. 2)

$$\triangle v = \frac{R}{\varrho} + \frac{T}{\tau},$$

wo ϱ und τ die in Gl. (11) und (12) angegebene Bedeutung haben, T das Drehmoment der lothrechten Lagerdrücke (sieh Abb. 1) bezeichnet,

$$T = C'c' - C''c'' \quad . \; . \; . \; . \; . \quad (25)$$

Hieraus folgt

$$R = \varrho \triangle v - \frac{T \cdot \varrho}{\tau} \quad . \; . \; . \; . \quad (26)$$

Die Aenderung des Bogenschubs infolge einer Spannweitenvergröſserung $\triangle l$ kann gesetzt werden

$$\triangle H = \alpha \triangle l \quad . \; . \; . \; . \; . \quad (27)$$

wo α den Bogenschub bezeichnet, der einer Vergröſserung $\triangle l = 1$ entspricht. Die Gröſse des geänderten Bogenschubs ist dann

$$\mathfrak{H} = H + \triangle H = H + \alpha \cdot \triangle l \quad . \; . \; . \quad (28)$$

Die Werthe von α sind aus der Theorie der Bogenträger bekannt. Für einen Vollbogen ist

$$\left.\begin{aligned} \alpha &= -E : \left[\frac{l \cos \varphi'}{F} + \int_0^l \frac{y^2 ds}{J}\right], \\ \text{angenähert } &= -E : \int_0^l \frac{y^2 ds}{J} \end{aligned}\right\} \quad (29)$$

wo φ' = Winkel der Bogentangente am Kämpfer mit der Wagerechten,

F = mittlerer Bogenquerschnitt,

E = Elasticitätsziffer des Bogens,

J = Trägheitsmoment des Bogenquerschnittes für die Abscisse x,

y = Ordinate der Bogenmittellinie für die Abscisse x,

ds = Element der Bogenmittellinie.

Für einen flachen Parabelbogen wird

$$\left.\begin{aligned} \alpha &= -\frac{15\,EJ}{8 f^2 l \left(1 + \frac{15}{8} \cdot \frac{i^2}{f^2}\right)} \quad . \; . \\ \text{angenähert } &= -\frac{15\,EJ}{8 f^2 l} \end{aligned}\right\} \quad (29^a)$$

wo J = Trägheitsmoment im Bogenscheitel,

$i^2 = J : F$ = Quadrat des Trägheitshalbmessers im Scheitel.

Für einen Fachwerkbogen ist

$$\alpha = -E : \Sigma \frac{y^2 s}{F m^2} \quad . \; . \; . \; . \; . \quad (29^b)$$

wo s = Länge eines Fachwerkstabes,

F = Querschnitt eines Fachwerkstabes,

y = Ordinate seines Gegenpunktes,

m = Länge der Normalen vom Gegenpunkt auf den Stab.

Da nach Gl. (5) $\triangle l = \triangle v'' - \triangle v'$, so geht Gl. (28) über in

$$\mathfrak{H} = H + \alpha\,(\triangle v'' - \triangle' v') \quad . \; . \; . \quad (28^a)$$

Das Gleichgewicht am r. Pfeiler erfordert

$$R_r = \mathfrak{H}_{r-1} - \mathfrak{H}_r,$$

d. h.
$$\varrho_r \triangle v_r - \frac{T_r \varrho_r}{\tau_r} = H_{r-1} + \alpha_{r-1}\,(\triangle v_r - \triangle v_{r-1}) - H_r - \alpha_r\,(\triangle v_{r+1} - \triangle v_r),$$

woraus

$$\left.\begin{aligned} &\triangle v_r\,(\varrho_r - \alpha_{r-1} - \alpha_r) + \triangle v_{r-1} \cdot \alpha_{r-1} + \triangle v_{r+1} \cdot \alpha_r \\ &= H_{r-1} - H_r + \frac{T_r \varrho_r}{\tau_r} \end{aligned}\right\} \quad (30)$$

Dies ist die gesuchte Grundgleichung, die ebenso oft mal aufgestellt werden kann, als wie unbekannte $\triangle v$ vorhanden sind.

Für gleichartige Verhältnisse werden alle ϱ, τ, α einander gleich; Gl. (29) vereinfacht sich dann zu

$$\left.\begin{aligned} &\triangle v_r\,(\varrho - 2\,\alpha) + \triangle v_{r+1} \cdot \alpha + \triangle v_{r+1} \cdot \alpha = H_{r-1} \\ &- H_r + \frac{T_r \varrho}{\tau} \end{aligned}\right\} \quad (30^a)$$

Auch hier läſst sich, ähnlich wie unter Ib angegeben, ein Näherungsverfahren zur Bestimmung der Gröſse $\triangle v$ anwenden. Man betrachtet immer nur drei Oeffnungen, von denen die mittlere belastet, die beiden äuſseren unbelastet sind, und setzt die Ausbiegungen der beiden äuſseren Pfeiler gleich $\frac{m'-1}{m'} \cdot \triangle v'$ und $\frac{m''-1}{m''} \cdot \triangle v''$, wo m' und m'' die Anzahl der links und rechts der betrachteten belasteten Oeffnung liegenden Oeffnungen, $\triangle v'$ und $\triangle v''$ die Ausbiegungen der zwei an die belastete Oeffnung anstoſsenden Pfeiler bezeichnen.

Dies Verfahren ergiebt etwas zu groſse Werthe für $\triangle v'$ und $\triangle v''$. Etwas zu kleine Werthe erhält man, wenn man wie unter Ib die Ausbiegungen der äuſseren zwei Pfeiler gleich Null setzt.

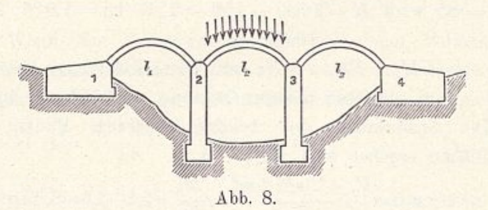


Abb. 8.

Im folgenden soll nun noch Gl. (30ᵃ) auf den in Abb. 8 dargestellten Fall einer Brücke mit drei gleichartigen Oeffnungen angewandt werden. Man hat

$$\triangle v_r = \triangle v, \quad \triangle v_{r-1} = -\triangle v, \quad \triangle v_{r+1} = o,$$

$$H_{r-1} = H_2 = eH + vH = (g+p)\frac{l^2}{8 f m},$$

$H_r = H_3 = eH = \frac{gl^2}{8fm}$, wo $m = 1 + \frac{15\,i^2}{8f^2}$ für flache Parabelbögen,

$T_r = T_3 = -vC\cdot c = -\frac{pl}{2}\cdot c.$

Gl. (30) geht über in

$$\left.\begin{array}{l}\triangle v\,(\varrho - 3\alpha) = vH - vCc\cdot\frac{\varrho}{\tau}\\ \triangle v = (vH - vCc):(\varrho - 3\alpha)\end{array}\right\} \quad . \; . \; . \quad (31)$$

Ferner ist

$$\left.\begin{array}{l}\triangle H_2 = 2\alpha\triangle v,\; \mathfrak{H}_2 = eH + vH + 2\alpha\triangle v\\ \triangle H_3 = -\alpha\triangle v,\; \mathfrak{H}_3 = eH - \alpha\triangle v\end{array}\right\} \quad (32)$$

$$\left.\begin{array}{l}R = \mathfrak{H}_2 - \mathfrak{H}_3 = vH + 3\alpha\triangle v = vH\\ + \frac{3\alpha}{\varrho - 3\alpha}\left(vH - vC\cdot c\frac{\varrho}{\tau}\right) = \frac{vH\varrho}{\varrho - 3\alpha} - \frac{vC\cdot c\varrho}{\tau}\frac{3\alpha}{\varrho - 3\alpha}\end{array}\right\} \quad (33)$$

Gl. (31) zeigt, daſs die Pfeilerausbiegung im Verhältniſs $\frac{\varrho}{\varrho - 3\alpha}$ kleiner ausfällt als bei starren Pfeilern. Die Pfeilerschubkraft R ist um $-3\alpha\triangle v$ kleiner als die bei starren Pfeilern auftretende Kraft vH, wobei zu beachten ist, daſs α eine negative Gröſse ist.

Die Minderung des Bogenschubs in der Mittelöffnung ist nach Gl. (32)

$$\left.\begin{array}{l}\triangle H_2 = 2\,\alpha\triangle v = \frac{2\,\alpha}{\varrho - 3\alpha}\left(vH - \frac{vC\cdot c\cdot\varrho}{\tau}\right),\\ \text{angenähert} = \frac{2\alpha}{\varrho - 3\alpha}\cdot vH\end{array}\right\} \quad (34)$$

Hierdurch ändert sich die obere Randspannung σ_1 eines Querschnittes x des Bogens um

$$\nu_1 = -\frac{\triangle H\cdot\mathfrak{D}_1}{W_x},\ \text{die untere}\ \sigma_2\ \text{um}\ \nu_2 = +\frac{\triangle H\cdot\mathfrak{D}_2}{W_x} \quad (35)$$

wo $\mathfrak{D}_1$ und $\mathfrak{D}_2$ die Ordinaten der entsprechenden Kernpunkte bezeichnen und das Zeichen + eine Druckspannung bedeutet.

Die Gesamtrandspannungen sind

$$\bar{\sigma}_1 = \sigma_1 + \nu_1 \ \text{und}\ \bar{\sigma}_2 = \sigma_2 + \nu_2 \quad . \; . \; . \quad (36)$$

Um die Abhängigkeit der Gröſsen $\triangle H$ und σ von den Grundmaſsen des Pfeilers klar überschauen zu können, setzen wir die Werthe von α für einen Vollbogen und von ϱ für eine Bodenziffer $\eta = \infty$ in die angenäherte Gl. (34) ein.

Es ergiebt sich

$$\triangle H = vH : \left[1{,}5 + 0{,}8\frac{\mathfrak{E}\mathfrak{J}}{EJ}\cdot\frac{f^2 l}{h^3}\right] \quad . \; . \; . \quad (37)$$

$\triangle H$ nimmt hiernach mit wachsender Starrheit des Bogens EJ und wachsender Pfeilerhöhe h zu, dagegen mit wachsender Starrheit des Pfeilers, wachsender Spannweite l und Pfeilhöhe f ab. Wenn bei wachsender Spannweite das Pfeilverhältniſs $f:l$ das gleiche bleibt und das Trägheitsmoment J des Bogens mit der dritten Potenz von l zunimmt, so bleibt $\triangle H$ ungeändert.

Die Nebenspannung ν ergiebt sich nach Gl. (35) allgemein zu

$$\nu = \pm\frac{\triangle H\mathfrak{D}}{W_x},$$

und nach Einsetzen der Werthe von $\triangle H$ und $W_x = \frac{J_x}{e_x}$

$$\nu = \pm\frac{vH\mathfrak{D}}{1{,}5 + 0{,}8\frac{\mathfrak{E}\mathfrak{J}}{EJ}\cdot\frac{f^2 l}{h^3}}\cdot\frac{e_x}{J_x} \quad . \; . \quad (38)$$

Läſst man die Bogenstärke in allen Querschnitten gleichmäſsig wachsen, so bleibt für jeden Querschnitt das Verhältniſs $J_x : J$ (J = mittleres Trägheitsmoment) unveränderlich, ν nimmt daher ab, falls alle anderen Gröſsen gleich bleiben.

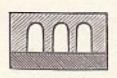
Setzt man einen Steinbogen von gleicher Wölbstärke d voraus, so ist $J = J_x = \frac{d^3}{12}$, $e_x = \frac{d}{2}$; ferner sei $\mathfrak{E} = E$ und $\mathfrak{J} = \frac{b^3}{12}$. Man erhält dann

$$\nu = \pm\frac{vH\cdot\mathfrak{D}\cdot 6}{\left(1{,}5 + 0{,}8\frac{b^3 f^2 l}{d^3 h^3}\right)d^2} = \pm\frac{vH\cdot\mathfrak{D}\cdot 6}{1{,}5d^2 + 0{,}8\frac{b^3 f^2 l}{dh^3}} \quad (39)$$

Solange d kleiner ist als $\frac{lb}{h}\sqrt[3]{\frac{0{,}8}{3}\cdot\frac{f^2}{l^2}}$, nimmt dieser Werth von ν mit wachsender Bogenstärke d zu bis zu einem bestimmten Höchstwerth. Bei weiterem Wachsthum von d nimmt ν sodann ständig ab.

Der Einfluſs von Stirnmauern auf die Formänderungen und Spannungen des Bauwerkes läſst sich dadurch berücksichtigen, daſs man deren Querschnitt bei der Bestimmung von J und W nach Schätzung ganz oder theilweise in Rechnung stellt.

Ist der Gewölbebogen durch Längsmäuerchen mit Längsgewölbchen in den Zwickeln versteift (Querschnitt in Abb. 9), so ist der gesamte Querschnitt des Mauerwerkes bei der Bestimmung von J zu berücksichtigen und der starken Veränderlichkeit des Trägheitsmomentes wegen die Gl. (29) zur Ermittlung des Beiwerthes α zu benutzen. In Gl. (38) ist nun das Verhältniſs J_x zum mittleren Trägheitsmoment J stark veränderlich; am kleinsten im Bogenscheitel. Hier wird i. a. die Nebenspannung ν durch die Ausführung der genannten Versteifungen erhöht, während sie sich allerdings in den Bogenzwickeln erniedrigt. Versteifungen können daher nicht in allen Fällen als Verstärkungen eines Bauwerkes bezeichnet werden.


Abb. 9.

Das Steifigkeitsverhältniſs $\mathfrak{E}\mathfrak{J} : EJ$ von Pfeiler und Bogen ist unter sonst gleichen Umständen bei Eisen in der Regel gröſser als bei Steinbogen, d. h. eiserne Bögen sind biegsamer als steinerne. Demgemäſs fällt die Aenderung des Bogenschubes nach Gleichung (37) bei eisernen Bögen kleiner aus als bei Gewölben.

Die Grundgleichungen (30) und (30[a]) können auch auf den Fall, wo es sich nur um eine einzige Oeffnung mit elastischen Endpfeilern handelt, angewandt werden. Man hat dann für den linksseitigen Endpfeiler

$$\left.\begin{array}{ll} & \varrho_1\triangle v_1 - \frac{T_1\varrho_1}{\tau_1} = -H - \alpha(\triangle v_2 - \triangle v_1),\\ \text{woraus} & \triangle v_1(\varrho_1 - \alpha) + \triangle v_2\cdot\alpha = -H + \frac{T_1\varrho_1}{\tau_1}\\ \text{und für den rechtseitigen} & \\ & \varrho_2\triangle v_2 - \frac{T_2\varrho_2}{\tau_2} = H + \alpha(\triangle v_2 - \triangle v_1),\\ \text{woraus} & \triangle v_2(\varrho_2 - \alpha) + \triangle v_1\cdot\alpha = H + \frac{T_2\varrho_2}{\tau_2}\end{array}\right\} \quad . \; (40)$$

Für gleichartige Endpfeiler gehen diese Gleichungen über in

$$\left.\begin{array}{ll} & \triangle v_1(\varrho - \alpha) + \triangle v_2\cdot\alpha = -H + \frac{T_1\varrho}{\tau}\\ \text{und} & \triangle v_2(\varrho - \alpha) + \triangle v_1\cdot\alpha = H + \frac{T_2\varrho}{\tau}\end{array}\right\} \; . \; . \quad (41)$$

Bei symmetrischer Belastung, wo $T_2 = -T_1$, folgt hieraus das selbstverständliche Ergebniſs

$$\triangle v_2 = -\triangle v_1 = \left(H + \frac{T_2 \varrho}{\tau}\right) : (\varrho - 2\alpha) \quad . \quad . \quad (42)$$

Ferner ist hierfür

$$\triangle H = 2\alpha \triangle v_1 = \left(H + \frac{T_2 \varrho}{\tau}\right) \frac{2\alpha}{\varrho - 2\alpha} \quad . \quad . \quad (43)$$

Für Wärmeänderungen lassen sich die hierbei eintretenden Verhältnisse ebenfalls mit Hülfe der Grundgleichungen (30) und (30[a]) beurtheilen. Als Gröſsen H sind dann diejenigen Bogenschübe einzusetzen, welche sich bei starren Pfeilern bei den gleichen Wärmeänderungen einstellen würden. Sind die Endpfeiler starr und die einzelnen Oeffnungen gleichartig, so erhält man das selbstverständliche Ergebniſs, daſs bei gleichmäſsiger Wärmeänderung alle $\triangle v$ gleich Null werden, daſs es hier also keinen Unterschied macht, ob die Zwischenpfeiler starr oder elastisch sind.

Zahlenbeispiel 3 (drei Steinbögen von 10 m Stützweite).

Es werden die in den früheren Beispielen angegebenen Grundwerthe beibehalten und die Wölbstärke des Bogens in der Mitte zu 60 cm angenommen.

Es ergiebt sich sodann: $J = 1800000$ cm⁴ auf 1 m Breite, $F = 6000$ qcm, $f = 250$ cm, $i^2 = J : F = 300$ cm², $E = 100000$ kg/qcm, $\mathfrak{E} = 60000$ kg/qcm,

$$\alpha = -\frac{15 EJ}{8 f^2 l \left(1 + \frac{15 i^2}{8 f^2}\right)} = -5350.$$

Für $\eta = 20$ ist nach dem Früheren $\varrho = 830$, $\tau = 1440000$, somit $R = vH + \frac{3\alpha}{\varrho - 3\alpha}\left(vH - vC \cdot c \cdot \frac{\varrho}{\tau}\right) = 2000 - 1800$

$= 200\,\mathrm{kg} = 0{,}1 \cdot 2000 = 0{,}1 \cdot vH.$

$$\triangle H = \frac{2\alpha}{\varrho - 3\alpha}\left(vH - \frac{vC \cdot c \cdot \varrho}{\tau}\right) = -1200\,\mathrm{kg} = -0{,}6 \cdot 2000$$

$= -0{,}6\,vH.$

Für $\eta = \infty$ ist $\varrho = 2700$, $\tau = 3600000$,

$R = 2000 - 1580 = 420\,\mathrm{kg} = 0{,}21 \cdot 2000 = 0{,}21\,vH.$

$\triangle H = -1050 = -0{,}525 \cdot 2000 = -0{,}525\,vH.$

Infolge ihrer Nachgiebigkeit werden die Pfeiler hiernach ganz wesentlich entlastet, auf 0,1 bezw. 0,21 des Betrages bei starren Pfeilern. Anderseits tritt eine starke Mehrbeanspruchung des Bogens ein, indem 0,6 bezw. 0,525 vH durch Balkenwirkung statt durch Bogenwirkung übertragen werden müssen.

Im Bogenscheitel entsteht mit $\triangle H = 0{,}6\,vH = -1200$ kg eine Nebenspannung der oberen Faser von

$$\nu_1 = +\frac{1200 \cdot 240}{W} = \frac{1200 \cdot 240}{60000} = +4{,}8 \text{ kg/qcm},$$

in der unteren Faser von

$$\nu_2 = -\frac{1200 \cdot 260}{60000} = -5{,}2 \text{ kg/qcm}.$$

Bei starren Pfeilern wären die entsprechenden Spannungen

$$\sigma_1 = \frac{eH + vH}{F} + \frac{M}{W} = \frac{13874}{6000} + \frac{31500}{60000} = 2{,}33 + 0{,}53$$

$= 2{,}86$ kg/qcm,

$\sigma_2 = 2{,}33 - 0{,}53 = 1{,}8$ kg/qcm.

Die rechnungsmäſsigen Gesamtspannungen sind somit

$$\overline{\sigma}_1 = \sigma_1 + \nu_1 = 2{,}86 + 4{,}8 = 7{,}66 \text{ kg/qcm},$$

$$\overline{\sigma}_2 = \sigma_2 + \nu_2 = 1{,}8 - 5{,}2 = -3{,}4 \text{ kg/qcm}.$$

Legt man der Rechnung statt Vollbelastung die für starre Pfeiler ungünstigste Laststellung zu Grunde, bei welcher etwa das mittlere Drittel der Brücke von der Last bedeckt wird, so erhält man zwar gröſsere Hauptspannungen σ, aber weit kleinere Nebenspannungen ν und somit kleinere Gesamtspannungen $\overline{\sigma}$. Die betreffenden Zahlenwerthe sind:

$$\overline{\sigma}_1 = \sigma_1 + \nu_1 = 3{,}17 + 2{,}3 = 5{,}47 \text{ kg/qcm},$$

$$\overline{\sigma}_2 = \sigma_2 + \nu_2 = 1{,}11 - 2{,}5 = -1{,}39 \text{ kg/qcm}.$$

Nach vorstehenden Rechnungsergebnissen treten infolge der Nachgiebigkeit der Pfeiler Zugspannungen in den unteren Punkten der Scheitelfuge auf.

Noch ungünstiger wird der Spannungszustand des Bogens bei groſser Kälte. Wenn sich der Wärmezustand sämtlicher Bogentheile um t Grad gegenüber der Herstellungswärme erniedrigt, so ändert sich der Bogenschub um

$$H_t = -\frac{15 EJ\omega t}{8 f^2 m}, \text{ wo } \omega = \text{Wärmedehnungsziffer};$$

$$m = 1 + \frac{15 i^2}{8 f^2}, \text{ annähernd} = 1.$$

Mit $\omega = \frac{1}{80000}$ und $t = 20^0$ erhält man $H_t = -1350$ kg und die entsprechenden Randspannungen im Scheitelquerschnitt

$$\tau_1 = -\frac{H_t \cdot \mathfrak{D}_1}{W} = \frac{1350 \cdot 240}{60000} = 5{,}4 \text{ kg/qcm},$$

$$\tau_2 = \frac{H_t \cdot \mathfrak{D}_2}{W} = -\frac{1350 \cdot 260}{60000} = -5{,}85 \text{ kg/qcm}.$$

Setzt man vorstehend statt des Zahlenwerthes von H_t dessen Formelwerth ein, sowie $W = \frac{J}{e}$, $\mathfrak{D}_1 = f - \frac{i^2}{e} = f - w$ und $\mathfrak{D}_2 = f + \frac{i^2}{e} = f + w$, so ergiebt sich

$$\tau_1 = \frac{15 E\omega t (fe - i^2)}{8 f^2 m} = \frac{15 E\omega t (f - w) e}{8 f^2 m}$$

und $$\tau_2 = \frac{15 E\omega t (fe + i^2)}{8 f^2 m} = \frac{15 E\omega t (f + w) e}{8 f^2 m}.$$

Beide Werthe sind unabhängig von der absoluten Gröſse des Trägheitsmomentes J und des Querschnittes F; sie hängen nur von den linearen Gröſsen e und w ab und wachsen annähernd im gleichen Verhältniſs wie die Bogenhöhe $2e$. Die Wärmespannungen fallen also um so kleiner aus, je niedriger der Bogen ist. Für starre Pfeiler wären die Gesamtspannungen

$$\overline{\sigma}_1 = \sigma_1 + \tau_1 = 2{,}86 + 5{,}4 = 8{,}26 \text{ kg/qcm},$$

$$\overline{\sigma}_2 = \sigma_2 + \tau_2 = 1{,}8 - 5{,}85 = -4{,}05 \text{ kg/qcm}.$$

Infolge der Nachgiebigkeit der Pfeiler erhöhen sich die rechnungsmäſsigen Gesamtspannungen auf

$$\overline{\sigma}_1 = \sigma_1 + \tau_1 + \nu_1 = 2{,}86 + 5{,}4 + 4{,}8 = 13{,}06 \text{ kg/qcm},$$

$$\overline{\sigma}_2 = \sigma_2 + \tau_2 + \nu_2 = 1{,}8 - 5{,}85 - 5{,}2 = -9{,}25 \text{ kg/qcm}.$$

In Wirklichkeit werden die Spannungen infolge der Veränderlichkeit der Elasticitätsziffer E etwas andere Werthe annehmen als berechnet, und zwar werden insbesondere die Zugspannungen etwas niedriger ausfallen. Bei gewöhnlichem Mauerwerk übersteigt jedoch trotzdem die Spannung $\overline{\sigma}_2$ die Zugfestigkeit des Mauerwerks; es entsteht ein Riſs im unteren Theile der Scheitelfuge.

Für diesen Fall aber sind die aufgestellten Formeln nicht mehr gültig; es tritt ein anderer Spannungs- bezw. Formänderungszustand des Bogens ein, als wie vorausgesetzt. Bezüglich einer näheren Betrachtung dieses Falles wird auf

Abschnitt IV verwiesen. Hier sei nur bemerkt, dafs die gröfste Druckspannung im obersten Punkte der theilweise geöffneten Scheitelfuge in Wirklichkeit über das oben ausgerechnete Mafs von 13,06 kg/qcm hinausgeht.

Es werde nun untersucht, in welchem Betrage die Gesamtspannungen durch Vergröfserung der Gewölbestärke von 60 auf 90 cm herabgemindert werden. Für

$d = 2e = 90$ cm wird $F_1 = 9000$ qcm, $J = 6\,075\,000$ cm^4, $i^2 = 675$ cm^2,

$W = 135\,000$ cm^3, $w = i^2 : e = 15$ cm, $vH = 1960$ kg,

$\alpha = 17\,900$; $\triangle H = -1200\,\text{kg} = -0{,}612 \cdot 1960 = -0{,}612\ vH$,

$$\nu_1 = \frac{1200 \cdot 235}{135\,000} = 2{,}09\,\text{kg},\quad \nu_2 = -\frac{1200 \cdot 265}{135\,000} = -2{,}35\,\text{kg}.$$

Das Eigengewicht der Brücke erhöht sich infolge der Gewölbverstärkung um rund 400 kg für das Meter. Der entsprechende Bogenschub wird $eH = 13\,720$ kg, $\sigma_1 = 2{,}33$, $\sigma_2 = 1{,}15$.

Die Wärmespannungen erhöhen sich auf $\tau_1 = 7{,}93$ und $\tau_2 = -8{,}94$ kg/qcm. Die Gesamtspannungen betragen hiernach

$$\bar{\sigma}_1 = 2{,}33 + 7{,}93 + 2{,}09 = 12{,}35\,\text{kg/qcm und}$$
$$\bar{\sigma}_2 = 1{,}15 - 8{,}94 - 2{,}35 = -10{,}14\,\text{kg/qcm}.$$

Sie sind nicht wesentlich anders als die bei einer Gewölbstärke von 60 cm auftretenden; die Verstärkung des Gewölbes um 50 v. H. hat die gröfste Druckspannung nur von 13,06 auf 12,35 kg erniedrigt und die gröfste Zugspannung von 9,25 auf 10,14 kg erhöht. Insofern die Zugbeanspruchungen für ein Gewölbe die weitaus gefährlicheren sind, ist im vorliegenden Falle die Verstärkung nachtheilig für das Gewölbe. Es rührt dies davon her, dafs die Wärmespannungen mit der Verstärkung des Gewölbes stärker gewachsen sind, als die anderen Spannungen abgenommen haben.

Zahlenbeispiel 4 (drei Eisenbögen von 20 m Stützweite).

Es sei für eine Strafsenbrücke $l = 2000$ cm, $f = \frac{1}{8} l = 250$ cm, $J = 135\,000$ cm^4, $W = J : e = 135\,000 : 50 = 2700$ cm^3, $p = 400$ kg, $g = 1200$ kg, $vH = 7500$ kg, $vC = 4000$ kg, $eH = 22\,500$ kg, $eC = 12\,000$ kg. Alles auf 1 m Pfeilerbreite bezogen. $E = 2\,000\,000$ kg/qcm. Für die Pfeiler sei $b_0 = 430$ cm, $J_0 = 720\,000\,000$, $J = \frac{1}{2} J_0 = 360\,000\,000$ cm^4, $\mathfrak{E} = 60\,000$ kg/qcm, $h = 2000$ cm. Man erhält $\alpha = -4000$ kg.

Für $\eta = 20$ wird $\varrho = 2500$, $\tau = 4\,320\,000$,

$$\text{somit}\quad \frac{3\alpha}{\varrho - 3\alpha} = -0{,}83,\quad \frac{2\alpha}{\varrho - 3\alpha} = -0{,}55,$$
$$vH - \frac{vC \cdot c \cdot \varrho}{\tau} = 7150.$$

$R = 7500 - 0{,}83 \cdot 7150 = 1566\,\text{kg} = 0{,}209 \cdot 7500 = 0{,}209 \cdot vH.$

$\triangle H = -0{,}55 \cdot 7150 = -3930 = -0{,}524 \cdot 7500 = -524\,vH.$

Die entsprechenden Randspannungen des Bogenscheitels betragen

$$\nu_1 = \frac{3930 \cdot 200}{2700} = 290\,\text{kg},\quad \nu_2 = -\frac{3930 \cdot 300}{2700} = -437\,\text{kg/qcm}.$$

Bei starren Pfeilern wären die entsprechenden Randspannungen des Bogens

$$\sigma_1 = 730\,\text{kg},\ \sigma_2 = 370\,\text{kg}.$$

Die Gesamtspannungen bei elastischen Pfeilern betragen demnach

$$\bar{\sigma}_1 = 730 + 290 = 1020\,\text{kg/qcm},$$
$$\bar{\sigma}_2 = 370 - 437 = -67\,\text{kg/qcm}.$$

Für $\eta = \infty$ wird $\varrho = 8100$, $\tau = 10\,800\,000$,

$$\text{somit}\quad \frac{3\alpha}{\varrho - 3\alpha} = -0{,}6,\quad \frac{2\alpha}{\varrho - 3\alpha} = -0{,}4,$$
$$vH - \frac{vC \cdot c \cdot \varrho}{\tau} = 7150.$$

$R = 7500 - 0{,}6 \cdot 7150 = 3210\,\text{kg} = 0{,}428 \cdot 7500 = 0{,}428 \cdot vH.$

$\triangle H = -0{,}4 \cdot 7150 = -2860 = -0{,}381 \cdot 7500 = -0{,}381\,vH.$

$$\nu_1 = \frac{2860 \cdot 200}{2700} = 212\,\text{kg},\quad \nu_2 = -\frac{2860 \cdot 300}{2700} = -318\,\text{kg/qcm}.$$

$$\bar{\sigma}_1 = 730 + 212 = 942\,\text{kg},\quad \bar{\sigma}_2 = 370 - 318 = +52\,\text{kg/qcm}.$$

Die Randspannungen der Pfeilersohle würden bei starren Pfeilern betragen

$$\sigma_1 = \frac{P}{\mathfrak{F}_0} + \frac{vH \cdot h - vC \cdot c}{\mathfrak{W}_0} = \frac{215\,200}{44\,000} + \frac{14\,400\,000}{3\,273\,000} = 4{,}9 + 4{,}4 = 9{,}3\,\text{kg},\quad \sigma_2 = 4{,}9 - 4{,}4 = 0{,}5\,\text{kg/qcm}.$$

Bei elastischen Pfeilern und $\eta = 20$ werden sie

$$\sigma_1 = 4{,}9 + \frac{R \cdot h - vC \cdot c}{\mathfrak{W}_0} = 4{,}9 + \frac{2\,532\,000}{3\,273\,000} = 4{,}9 + 0{,}8 = 5{,}7\,\text{kg},\quad \sigma_2 = 4{,}9 - 0{,}8 = 4{,}1\,\text{kg/qcm}.$$

Bei elastischen Pfeilern und $\eta = \infty$ wird $\sigma_1 = 4{,}9 + 1{,}7 = 6{,}6$ kg, $\sigma_2 = 4{,}9 - 1{,}7 = 3{,}2$ kg/qcm.

Die vorstehenden Zahlenwerthe lassen erkennen, in wie hohem Mafse auch bei eisernen Bögen der Kräfteplan des Bauwerkes durch die Nachgiebigkeit der Pfeiler geändert wird. Es tritt eine wesentliche Spannungserhöhung im Bogen ein, während im Pfeiler die Spannungsvertheilung eine günstigere wird. Die Spannungserhöhung im Bogenscheitel beträgt, bei der angenommenen Vollbelastung und bei einer Bodenziffer $\eta = 20$, 40 v. H.; bei $\eta = \infty$, 29 v. H.

Die Spannungsminderung in der Pfeilersohle beträgt, bei $\eta = 20$, 63 v. H.; bei $\eta = \infty$, 41 v. H.

Wenn sich die Wärme um 27° erniedrigt, so mindert sich der Bogenschub um $H_t = -\dfrac{15\mathfrak{E}\mathfrak{J}\omega t}{8f^2 m} = -2700$ kg und die Randspannungen des Scheitelquerschnittes ändern sich um $\tau_1 = 200$ kg, $\tau_2 = -300$ kg/qcm. Die Gesamtspannungen erhöhen sich bei $\eta = 20$ auf

$$\bar{\sigma}_1 = \sigma_1 + \tau_1 + \nu_1 = 730 + 200 + 290 = 1220\,\text{kg/qcm}$$
$$\text{und}\quad \bar{\sigma}_2 = \sigma_2 + \tau_2 + \nu_2 = 370 - 300 - 437 = -467\,\text{kg/qcm},$$

während sie bei starren Pfeilern nur $\bar{\sigma}_1 = 930$ und $\bar{\sigma}_2 = 70$ kg betragen würden. Die Spannung steigt hiernach im Bogenscheitel um 31 v. H. gegenüber der bei starren Pfeilern unter ungünstigsten Verhältnissen (grofse Kälte). Wie im vorigen Beispiel ausgeführt, wachsen die Wärmespannungen annähernd im gleichen Verhältnifs wie die Bogenhöhe $2e$; sie fallen also um so kleiner aus, je niedriger der Bogen ist. Anderseits nehmen aber die Hauptspannungen σ mit wachsender Bogenhöhe ab, da hierbei das Widerstandsmoment des Quer-

schnittes zunimmt und somit die bei einseitiger Verkehrsbelastung auftretenden Biegungsmomente leichter aufgenommen werden. Es muſs deshalb eine bestimmte Bogenhöhe geben, bei welcher die Gesamtspannung ihren Kleinstwerth erreicht. Auf die Bestimmung dieser günstigsten Bogenhöhe kann hier nicht näher eingegangen werden; doch sei bemerkt, daſs das günstigste Höhenverhältniſs um so geringer wird, je mehr das Eigengewicht die Verkehrslast überwiegt, also je gröſser die Spannweite ist. Bei Straſsenbrücken ist es kleiner als bei Eisenbahnbrücken gleicher Spannweite; am kleinsten ist es bei Canalbrücken, wo eine einseitige Verkehrslast überhaupt nicht in Frage kommt. Hier wird man den Bogen so niedrig, als es bauliche oder ästhetische Rücksichten verlangen, ausführen.

b) Die Aenderungen $\triangle l$ und $\triangle f$ werden berücksichtigt.

Einer Spannweitenvergröſserung $\triangle l$ entspricht bei flachen Parabelbögen von unveränderlicher Länge eine Vergröſserung des Pfeils von ungefähr

$$\triangle f = -\frac{3}{16}\frac{l}{f}\triangle l \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (44)$$

welcher Betrag näherungsweise auch für andere Bogenformen beibehalten werden kann.

Der normale, bei festen Widerlagern auftretende Bogenschub H steigt unter Berücksichtigung der Längenänderungen $\triangle l$ und $\triangle f$ auf

$$\left.\begin{aligned}\mathfrak{H} &= H\left(1+\frac{\triangle l}{l}\right)\left(1-\frac{\triangle f}{f}\right) = H\left[1+\triangle l\left(\frac{1}{l}+\frac{3}{16}\frac{l}{f^2}\right)\right]\\ &= H\left[1+(\triangle v''-\triangle v')\left(\frac{1}{l}+\frac{3}{16}\frac{l}{f^2}\right)\right]\\ &= H\left[1+\frac{(\triangle v''-\triangle v')}{l}\left(1+\frac{3l^2}{16f^2}\right)\right]\\ &= H\left[1+\frac{\triangle v''-\triangle v'}{l}\cdot\delta\right]\end{aligned}\right\}(45)$$

wo $\delta = 1+\frac{3l^2}{16f^2}$ gesetzt wurde.

Hierzu kommt nun noch die unter a) abgeleitete Aenderung des Bogenschubs, die dem Ausweichen der Widerlager entspricht, $= \alpha\cdot\triangle l = \alpha(\triangle v''-\triangle v')$, wobei der Beiwerth α die in Gl. (29), (29^a), (29^b) angegebene Gröſse besitzt. Insgesamt ist daher der Werth des neuen Bogenschubs

$$\left.\begin{aligned}\mathfrak{H} &= H\left[1+\frac{\triangle l}{l}\delta\right]+\alpha\triangle l = H+\left(H\frac{\delta}{l}+\alpha\right)\triangle l\\ &= H+\left(H\frac{\delta}{l}+\alpha\right)(\triangle v''-\triangle v')\end{aligned}\right\}(46)$$

$$= H+\mathfrak{a}(\triangle v''-\triangle v'), \text{ wo } \mathfrak{a} = \frac{H\delta}{l}+\alpha \quad . \quad . \quad . \quad (47)$$

Die Aenderung des Bogenschubs $\triangle H = \mathfrak{H}-H = \mathfrak{a}(\triangle v''-\triangle v')$ ist in den Fällen der Anwendung stets negativ für positive Spannweitenvergröſserung, d. h. in dem Werthe von $\mathfrak{a}$ überwiegt der negative Einfluſs von α den positiven von $\frac{H\delta}{l}$. Um das gegenseitige Verhältniſs der beiden Gröſsen α und $\frac{H\delta}{l}$ allgemein überschauen zu können, setzen wir den Querschnitt des Bogens im Scheitel $F = H:k$, wo k einen entsprechenden Mittelwerth der Spannung bezeichnet.

Es ist sodann $J = Fi^2 = \frac{Hi^2}{k}$; nach Gl. (29^a) $\alpha = -\frac{15EJ}{8f^2l}$ $= -\frac{15EHi^2}{8f^2lk}$, $\delta = 1+\frac{3l^2}{16f^2}$, $\mathfrak{a} = \alpha+\frac{H\delta}{l} = -\frac{15EHi^2}{8f^2lk}$ $+H\frac{16f^2+3l^2}{16f^2l} = \frac{H}{16f^2l}\left(-\frac{30Ei^2}{k}+16f^2+3l^2\right)$. Dieser Ausdruck bleibt negativ, so lange $\frac{30Ei^2}{k} > 16f^2+3l^2$.

Setzt man für Eisen im Mittel

$$E = 2000000, \quad k = 666 \text{ kg/qcm},$$

so lautet die Bedingung $90000 i^2 > 16f^2+3l^2$ oder

$$90000\frac{i^2}{l^2} > 16\frac{f^2}{l^2}+3.$$

Der Grenzwerth $\mathfrak{a} = 0$ wird erreicht für

$$\frac{i}{l} = \sqrt{16\frac{f^2}{l^2}+3:300},$$

oder $\frac{i}{l} = 0{,}006$, wenn $\frac{f}{l} = \frac{1}{8}$ angenommen. In Wirklichkeit dürfte der Werth von i bei Eisenbögen selten kleiner als $0{,}02\,l$ sein.

Für Steinbögen kann im Mittel $E:k = 10000$ gesetzt werden. Die Bedingung für einen negativen Werth von $\mathfrak{a}$ ist dann $300000 i^2 > 16f^2+3l^2$. Der Grenzwerth von $\mathfrak{a}$ wird erreicht, wenn

$$\frac{i}{l} = \sqrt{16\frac{f^2}{l^2}+3:548},$$

oder $\frac{i}{l} = \frac{1}{274} = 0{,}0036$, falls $\frac{f}{l} = \frac{1}{4}$ angenommen.

Der Trägheitshalbmesser eines rechteckigen Querschnittes von der Höhe d (Wölbstärke) ist nun $i = d:\sqrt{12} = d:3{,}46$; es entspricht somit dem Grenzwerth von $\mathfrak{a}$ eine Wölbstärke $d = 3{,}46\,i = \frac{3{,}46}{274}l = $ rund $\frac{l}{80}$, während in der Ausführung d wohl nie unter $\frac{l}{20}$ sinkt.

Führt man die ungünstigsten Werthe von $\frac{i}{l}$ in die Gleichung von $\mathfrak{a}$ ein,

$$\left.\begin{aligned}\mathfrak{a} &= -\frac{15EHi^2}{8f^2lk} = H\frac{16f^2+3l^2}{16f^2l}\\ &= -\frac{15EHi^2}{8f^2lk}\left(1-\frac{16f^2+3l^2}{30Ei^2}\cdot k\right) = \alpha\left(1-\frac{16f^2+3l^2}{30Ei^2}k\right),\end{aligned}\right\}(48)$$

so erhält man für Eisen wie für Stein etwa $\mathfrak{a} = \frac{14}{15}\alpha$.

Man kann hiernach bei Bögen mit zwei Gelenken ohne groſsen Fehler den Einfluſs von $\triangle l$ und $\triangle f$ auf den Kräfteplan vernachlässigen und unbedenklich die unter a) entwickelten Formeln benutzen.

Will man schärfer rechnen, so hat man wie unter Ib zu setzen,

$$\triangle v_r = \frac{R}{\varrho}+\frac{\mathfrak{M}}{\tau}+\frac{P}{\pi}\triangle v_r+\frac{Q}{\psi}\triangle v_r,$$

$$R_r = \mathfrak{H}_{r-1}-\mathfrak{H}_r = H_{r-1}+\mathfrak{a}_{r-1}(\triangle v_r-\triangle v_{r-1})$$
$$-H_r-\mathfrak{a}_r(\triangle v_{r+1}-\triangle v_r),$$

$$\mathfrak{M} = T_r+(H_{r-1}+H_r)\frac{cz\triangle v_r}{h}, \text{ genau genug } = T_r,$$

und erhält sodann die Grundgleichung

$$\left.\begin{aligned}&\triangle v_r\left[1-\frac{\mathfrak{a}_{r-1}+\mathfrak{a}_r}{\varrho}-\frac{P}{\pi}-\frac{Q}{\psi}\right]+\triangle v_{r-1}\mathfrak{a}_{r-1}\\ &+\triangle v_{r+1}\mathfrak{a}_r = \frac{H_{r-1}-H_r}{\varrho}+\frac{T_r}{\tau}\end{aligned}\right\}(49)$$

Berücksichtigt man, dafs $\frac{\mathfrak{a}_{r-1}+\mathfrak{a}_r}{\varrho}$ eine negative Gröfse und stets viel gröfser ist als $\frac{P}{\pi}+\frac{Q}{\psi}$, so erkennt man, dafs der Factor von $\triangle v_r$ stets gröfser als 1, also niemals gleich Null wird. Es kann daher bei Zweigelenkbogen ein Ausknicken der Pfeiler in der Art, wie dies nach Ib bei Dreigelenkbogen möglich ist, niemals eintreten.

III. Bogen ohne Gelenke.

a) Die Aenderungen $\triangle l$ und $\triangle f$ werden vernachlässigt.

Auch hier biegen sich wie bei Bögen mit zwei Gelenken sämtliche Pfeiler nach aufsen, wenn eine der Oeffnungen belastet wird; die Spannweite der belasteten Oeffnung wird gröfser, die der übrigen, unbelasteten kleiner. In der belasteten Oeffnung fallen die Einspannungsmomente gröfser, der Bogenschub kleiner aus als wie bei starren Pfeilern; die Pfeiler werden schwächer, die Bögen stärker beansprucht als dies bei starren Pfeilern der Fall wäre, indem ein Theil der Last durch Balkenwirkung auf die Pfeiler übertragen wird.

Die Ausbiegungen der Pfeiler sind bei gelenklosen Bögen kleiner als bei Zweigelenkbogen; dementsprechend treten bei ersteren geringere Aenderungen des Kräfteplans der Pfeiler ein.

Um die Aufgabe bei beliebiger Belastungsweise zu lösen, werden die Ausbiegungen $\triangle v$ der Pfeilerköpfe und die Drehungen $\triangle\varphi$ der oberen Pfeilertangenten (positiv, wenn im Sinne des Uhrzeigers) als Unbekannte eingeführt. Durch diese Gröfsen können dann die Pfeilergegenkräfte R, die Pfeilergegenmomente N, die Schübe der Bögen $\mathfrak{H}$ und die Einspannungsmomente der Bögen $\mathfrak{M}'$ und $\mathfrak{M}''$ ausgedrückt werden.

Zur Bestimmung der $2(n+1)$ Unbekannten, $\triangle v$ und $\triangle\varphi$, dienen für jeden der $n+1$ Pfeiler zwei Gleichungen, Summe aller wagerechten Kräfte gleich Null und Summe aller Drehmomente gleich Null. Die Zahl der Unbekannten und der Gleichungen mindert sich auf $2(n-1)$, wenn die Endpfeiler als starr vorausgesetzt werden dürfen.

Die Gröfsen $R\,N\,\mathfrak{H}\,\mathfrak{M}'\,\mathfrak{M}''$ lassen sich in folgender Form als Functionen der Unbekannten $\triangle v$ und $\triangle\varphi$ ausdrücken:

$$\left.\begin{aligned}R&=\varrho\triangle v+\lambda\triangle\varphi\\N&=\mu\triangle v+\nu\triangle\varphi\end{aligned}\right\}\quad(50^{a})$$

$$\left.\begin{aligned}\mathfrak{H}&=\alpha(\triangle v''-\triangle v')+\alpha'\triangle\varphi'+\alpha''\triangle\varphi''+H\\\mathfrak{M}'&=\beta(\triangle v''-\triangle v')+\beta'\triangle\varphi'+\beta''\triangle\varphi''+M'+K'\\\mathfrak{M}''&=\gamma(\triangle v''-\triangle v')+\gamma'\triangle\varphi'+\gamma''\triangle\varphi''+M''+K''\end{aligned}\right\}\quad(50^{b})$$

wo sich der Bogenschub H und die Einspannungsmomente M' und M'' auf starre Pfeiler beziehen und als bekannt vorauszusetzen sind, da sie in bekannter Weise mit Hülfe der gewöhnlichen Bogentheorie berechnet werden können.

$\triangle v'$ und $\triangle\varphi'$ beziehen sich jeweils auf den linkseitigen, $\triangle v''$ und $\triangle\varphi''$ auf den rechtseitigen Pfeiler einer Oeffnung. K' und K'' bezeichnen Gröfsen, die von der Höhenänderung der Pfeiler herrühren.

Das Gleichgewicht am r. Pfeiler erfordert nun

$$R_r=\mathfrak{H}_{r-1}-\mathfrak{H}_r \text{ und } N_r=\mathfrak{M}''_{r-1}-\mathfrak{M}'_r+T_r\quad.\quad(51)$$

wo T_r das Drehmoment der lothrechten Lagerdrücke bezeichnet (vgl. Gl. 25).

Nach Einsetzen der Ausdrücke von $R\,N\,\mathfrak{H}\,\mathfrak{M}'\,\mathfrak{M}''$ erhält man die zwei Grundgleichungen

$$\left.\begin{aligned}&\triangle v_r(\varrho_r-\alpha_{r-1}-\alpha_r)+\triangle v_{r-1}\alpha_{r-1}+\triangle v_{r+1}\alpha_r\\&+\triangle\varphi_r(\lambda_r-\alpha''_{r-1}+\alpha'_r)-\triangle\varphi_{r-1}\alpha'_{r-1}\\&+\triangle\varphi_{r+1}\alpha''_r=H_{r-1}H_r\end{aligned}\right\}\quad(52)$$

$$\left.\begin{aligned}&\triangle v_r(\mu_r-\gamma_{r-1}-\beta_r)+\triangle v_{r-1}\gamma_{r-1}+\triangle v_{r+1}\beta_r\\&+\triangle\varphi_r(\nu_r-\gamma''_{r-1}+\beta'_r)-\triangle\varphi_{r-1}\gamma'_{r-1}\\&+\triangle\varphi_{r+1}\beta''_r=M''_{r-1}-M'_r+T_r+K''_{r-1}-K'_r\end{aligned}\right\}\quad(53^{a})$$

Für gleichartige Oeffnungen können die unteren Beizeichen der Beiwerthe weggelassen und $\alpha''=-\alpha'=\beta=\gamma$; $\gamma''=-\beta'$, $\beta''=-\gamma'$ gesetzt werden. Die zwei Grundgleichungen vereinfachen sich dann zu

$$\left.\begin{aligned}&\triangle v_r(\varrho-2\alpha)+\triangle v_{r-1}\alpha+\triangle v_{r+1}\alpha\\&+\triangle\varphi_r(\lambda-2\beta)+\triangle\varphi_{r-1}\beta+\triangle\varphi_{r+1}\beta=H_{r-1}-H_r\end{aligned}\right\}\quad(53)$$

$$\left.\begin{aligned}&\triangle v_r(\mu-2\beta)+\triangle v_{r-1}\beta+\triangle v_{r+1}\beta\\&+\triangle\varphi_r(\nu+2\beta')-\triangle\varphi_{r-1}\gamma'-\triangle\varphi_{r+1}\gamma'\\&=M''_{r-1}-M'_r+T_r+K''_{r-1}-K'_r\end{aligned}\right\}\quad(53^{a})$$

Bestimmung der Beiwerthe $\varrho\,\lambda\,\mu\,\nu$.

Für einen am oberen Ende durch eine wagrechte Kraft R und ein Moment N angegriffenen, am unteren Ende elastisch eingespannten Stab ist mit den früheren Bezeichnungen (Abb. 10)

Abb. 10.

$$\left.\begin{aligned}\triangle\varphi&=\int_0^h\frac{M\,dx}{\mathfrak{E}\mathfrak{J}}+\frac{M_0}{\eta\mathfrak{J}_0}=\int_0^h\frac{R(h-x)+N}{\mathfrak{E}\mathfrak{J}}dx\\&+\frac{Rh+N}{\eta\mathfrak{J}_0}=R\left(\int_0^h\frac{(h-x)\,dx}{\mathfrak{E}\mathfrak{J}}+\frac{h}{\eta\mathfrak{J}_0}\right)\\&+N\left(\int_0^h\frac{dx}{\mathfrak{E}\mathfrak{J}}+\frac{1}{\eta\mathfrak{J}_0}\right).\end{aligned}\right\}\quad(54)$$

$$\left.\begin{aligned}\triangle v&=\int_0^h\frac{M(h-x)\,dx}{\mathfrak{E}\mathfrak{J}}+\frac{M_0h}{\eta\mathfrak{J}_0}\\&=\int_0^h\frac{R(h-x)^2+N(h-x)}{\mathfrak{E}\mathfrak{J}}dx+\frac{Rh^2+Nh}{\eta\mathfrak{J}_0}\\&=R\left(\int_0^h\frac{(h-x)^2\,dx}{\mathfrak{E}\mathfrak{J}}+\frac{h^2}{\eta\mathfrak{J}_0}\right)\\&+N\left(\int_0^h\frac{(h-x)\,dx}{\mathfrak{E}\mathfrak{J}}+\frac{h}{\eta\mathfrak{J}_0}\right).\end{aligned}\right\}\quad(55)$$

Für unveränderliches $\mathfrak{J}$ bezw. für einen entsprechenden Mittelwerth ergiebt sich

$$\triangle\varphi=R\left(\frac{h^2}{2\,\mathfrak{E}\mathfrak{J}}+\frac{h}{\eta\mathfrak{J}_0}\right)+N\left(\frac{h}{\mathfrak{E}\mathfrak{J}}+\frac{1}{\eta\mathfrak{J}_0}\right)\quad.\quad(56)$$

$$\triangle v=R\left(\frac{h^3}{3\,\mathfrak{E}\mathfrak{J}}+\frac{h^2}{\eta\mathfrak{J}_0}\right)+N\left(\frac{h^2}{2\,\mathfrak{E}\mathfrak{J}}+\frac{h}{\eta\mathfrak{J}_0}\right)\quad.\quad(57)$$

Mit Hülfe der beiden Gleichungen (54) und (55) bezw. (56) und (57) können nun die Gröfsen R und N als Functionen von $\triangle\varphi$ und $\triangle v$ dargestellt, d. h. die Beiwerthe $\varrho\,\lambda\,\mu\,\nu$ bestimmt werden. Die Rechnung soll nur für die Gl. (56) und (57) durchgeführt werden. Man erhält

$$R=\left[\triangle v\left(\frac{h}{\mathfrak{E}\mathfrak{J}}+\frac{1}{\eta\mathfrak{J}_0}\right)-\triangle\varphi\left(\frac{h^2}{2\,\mathfrak{E}\mathfrak{J}}+\frac{h}{\eta\mathfrak{J}_0}\right)\right]$$
$$\left(\frac{h^4}{12\,\mathfrak{E}^2\mathfrak{J}^2}+\frac{h^3}{3\,\mathfrak{E}\mathfrak{J}\eta\mathfrak{J}_0}\right)$$

$$N=\left[-\triangle v\left(\frac{h^2}{2\,\mathfrak{E}\mathfrak{J}}+\frac{h}{\eta\mathfrak{J}_0}\right)+\triangle\varphi\left(\frac{h^3}{3\,\mathfrak{E}\mathfrak{J}}+\frac{h^2}{\eta\mathfrak{J}_0}\right)\right]$$
$$:\left(\frac{h^4}{12\,\mathfrak{E}^2\mathfrak{J}^2}+\frac{h^3}{3\,\mathfrak{E}\mathfrak{J}\eta\mathfrak{J}_0}\right)$$

$$\left.\begin{aligned}
\varrho &= \left(\frac{h}{\mathfrak{E}\mathfrak{J}}+\frac{1}{\eta\mathfrak{J}_0}\right):\left(\frac{h^4}{12\,\mathfrak{E}^2\mathfrak{J}^2}+\frac{h^3}{3\,\mathfrak{E}\mathfrak{J}\eta\mathfrak{J}_0}\right)=\left(h+\frac{\mathfrak{E}\mathfrak{J}}{\eta\mathfrak{J}_0}\right)\\
&\quad :\left(\frac{h^4}{12\,\mathfrak{E}\mathfrak{J}}+\frac{h^3}{3\,\eta\mathfrak{J}_0}\right)\\
\varrho &= \frac{12\,\mathfrak{E}\mathfrak{J}}{h^3}\ \text{für } \eta=\infty.
\end{aligned}\right\}\quad(58)$$

$$\left.\begin{aligned}
\lambda &= -\left(\frac{h}{2}+\frac{\mathfrak{E}\mathfrak{J}}{\eta\mathfrak{J}_0}\right):\left(\frac{h^3}{12\,\mathfrak{E}\mathfrak{J}}+\frac{h^2}{3\,\eta\mathfrak{J}_0}\right)\\
\lambda &= -\frac{6\,\mathfrak{E}\mathfrak{J}}{h^2}\ \text{für } \eta=\infty.
\end{aligned}\right\}\quad(59)$$

$$\left.\begin{aligned}
\mu &= -\left(\frac{h}{2}+\frac{\mathfrak{E}\mathfrak{J}}{\eta\mathfrak{J}_0}\right):\left(\frac{h^3}{12\,\mathfrak{E}\mathfrak{J}}+\frac{h^2}{3\,\eta\mathfrak{J}_0}\right)\\
\mu &= -\frac{6\,\mathfrak{E}\mathfrak{J}}{h^2}\ \text{für } \eta=\infty.
\end{aligned}\right\}\quad(60)$$

$$\left.\begin{aligned}
\nu &= \left(\frac{h}{3}+\frac{\mathfrak{E}\mathfrak{J}}{\eta\mathfrak{J}_0}\right):\left(\frac{h^2}{12\,\mathfrak{E}\mathfrak{J}}+\frac{h}{3\,\eta\mathfrak{J}_0}\right)\\
\nu &= \frac{4\,\mathfrak{E}\mathfrak{J}}{h}\ \text{für } \eta=\infty.
\end{aligned}\right\}\quad(61)$$

Die beiden Beiwerthe λ und μ sind entsprechend dem erweiterten Satze von der Gegenseitigkeit der Verschiebungen einander gleich.

Bestimmung der Beiwerthe $\alpha\,\alpha'\,\alpha''\,\beta\,\beta'\,\beta''\,\gamma\,\gamma'\,\gamma''$.

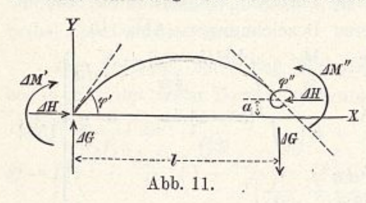


Abb. 11.

Die Beziehungsgleichungen, die zwischen den Lageränderungen $\triangle\varphi'$ $\triangle\varphi''$ und $\triangle l\,(=\triangle v''-\triangle v')$ einerseits und den Aenderungen von Bogenschub $\triangle H$ und Einspannungsmomenten $\triangle M'$ und $\triangle M''$ anderseits bestehen (Abb. 11), lauten für Vollträger:

$$\left.\begin{aligned}
E(\triangle\varphi'-\triangle\varphi'') &= \triangle M'\int\frac{ds}{J}+\triangle G\left(\int\frac{xds}{J}+\frac{dy}{Fr}\right)\\
&\quad -\triangle H\left(\int\frac{yds}{J}-\frac{dx}{Fr}\right)\\
E(\triangle l-a\triangle=\varphi'')\ &\triangle M'\int\frac{yds}{J}\\
&\quad \triangle G\left(\int\frac{xyds}{J}-\frac{\cos\varphi'\,dy}{F}\right)\\
&\quad -\triangle H\left(\int\frac{y^2ds}{J}+\frac{\cos\varphi'\,dx}{F}\right)\\
-E(\triangle a+l\triangle\varphi'') &= \triangle M'\int\frac{xds}{J}\\
&\quad +\triangle G\left(\int\frac{x^2ds}{J}+\frac{\sin\varphi'dy}{F}\right)\\
&\quad -\triangle H\left(\int\frac{xyds}{J}-\frac{\sin\varphi'dx}{F}\right)
\end{aligned}\right\}\quad(62)$$

In diesen Gleichungen bezeichnet ds das Bogenelement, F und J die i. a. mit der Abscisse x veränderlichen Werthe von Querschnitt und Trägheitsmoment des Bogens, a die Ordinate des rechtseitigen Auflagers, $\triangle G$ der lothrechte Lagerdruck am linkseitigen Lager. Zwischen $\triangle G$ und den Gröfsen $\triangle H$ $\triangle M'$ und $\triangle M''$ herrscht die Beziehung

$$\triangle G=\frac{\triangle M''-\triangle M'+\triangle H\cdot a}{l}\quad .\ .\ .\quad(63)$$

Gewöhnlich ist $a=0$, also $\triangle G=\dfrac{\triangle M''-\triangle M'}{l}$ (63ª)

Für symmetrische flache Bögen gehen die Gl. (62) über in

$$\left.\begin{aligned}
EJ(\triangle\varphi'-\triangle\varphi'') &= \triangle M'l+\frac{\triangle Gl^2}{2}-\triangle Hkl\\
EJ\triangle l\qquad &= \triangle M'kl+\frac{\triangle Gkl^2}{2}\\
&\quad -\triangle H(lu^2+li^2\cdot\cos\varphi')\\
-EJ(\triangle a+l\triangle\varphi'') &= \frac{\triangle M'l^2}{2}+\frac{\triangle Gl^3}{3}-\frac{\triangle Hkl^2}{2}
\end{aligned}\right\}\quad(64)$$

wo J und i das Trägheitsmoment und den Trägheitshalbmesser des Scheitelquerschnitts,

$$\left.\begin{aligned}
&k \text{ die mittlere Bogenordinate, } lk=\int y\,dx\\
&u^2 \text{ den Mittelwerth von } y^2, \text{ d. h. } lu^2=\int y^2dx
\end{aligned}\right\}\quad(65)$$

bezeichnen.

Die Aenderungen $\triangle\varphi'$ und $\triangle\varphi''$ sind positv, wenn im Sinne des Uhrzeigers vor sich gehend, $\triangle a$ positiv, wenn eine Hebung des rechtseitigen Lagers eintritt.

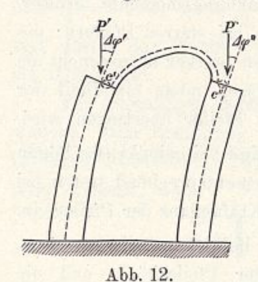


Abb. 12.

Infolge der Pfeilerbiegungen hebt sich das rechtsseitige Lager gegenüber dem linksseitigen um $c''\triangle\varphi''+c'\triangle\varphi'$ (Abb. 12) oder, wenn wie gewöhnlich $c'=c''$, um $c(\triangle\varphi'+\triangle\varphi'')$.

Hierzu kommen noch die Längenänderungen der Pfeilerachse und die Zusammendrückungen des Baugrundes.

Infolge von Wärmeerhöhungen t' und t'' der zwei h' und h'' hohen Pfeiler hebt sich das rechtsseitige Lager um $h''\omega t'-h'\omega t'$, wo $\omega=$ Wärmedehnungsziffer.

Durch ungleiche lothrechte Belastungen P' und P'' der Pfeiler entsteht eine relative Hebung von

$$\int_0^h\frac{P'dh}{\mathfrak{E}\mathfrak{F}'}-\int_0^h\frac{P''dh}{\mathfrak{E}\mathfrak{F}''}+\frac{P'}{\eta\mathfrak{F}_0'}-\frac{P''}{\eta\mathfrak{F}_0''}$$

bezw. von

$$\frac{P'h'}{\mathfrak{E}\mathfrak{F}'}-\frac{P''h''}{\mathfrak{E}\mathfrak{F}''}+\frac{P'}{\eta\mathfrak{F}_0'}-\frac{P''}{\eta\mathfrak{F}_0''},$$

wenn $\mathfrak{F}'$ und $\mathfrak{F}''$ mittlere Pfeilerquerschnitte bezeichnen.

Der gesamte von der Längenänderung der Pfeilerachse und der Bodenpressung herrührende Theil ist

$$\triangle h=h''\omega t''-h'\omega t'+P'\left(\frac{h'}{\mathfrak{E}\mathfrak{F}'}+\frac{1}{\eta\mathfrak{F}_0'}\right)-P''\left(\frac{h''}{\mathfrak{E}\mathfrak{F}''}+\frac{1}{\eta\mathfrak{F}_0''}\right)\quad(66)$$

und die gesamte relative Hebung des rechtsseitigen Lagers

$$\triangle a=c(\triangle\varphi'+\triangle\varphi'')+\triangle h\quad .\ .\ .\ .\quad(67)$$

Aus den Gl. (64) und (63ª) folgt nun

$$\left.\begin{aligned}
\triangle G &= -\frac{6\,EJ}{l^3}[\triangle\varphi'(l+2c)+\triangle\varphi''(l+2c)+2\triangle h]\\
\triangle H &= \frac{EJ}{l}\cdot\frac{k(\triangle\varphi'-\triangle\varphi'')-\triangle l}{u^2-k^2+i^2\cos\varphi'}=\triangle l\left(-\frac{EJ}{ln^2}\right)\\
&\quad +\triangle\varphi'\frac{EJk}{ln^2}+\triangle\varphi''\left(-\frac{EJk}{ln^2}\right)\\
\triangle M' &= \triangle l\left(-\frac{EJk}{ln^2}\right)+\triangle\varphi'\left(4+\frac{k^2}{n^2}+\frac{6c}{l}\right)\frac{EJ}{l}\\
&\quad +\triangle\varphi''\left(2-\frac{k^2}{n^2}+\frac{6c}{l}\right)\frac{EJ}{l}+\frac{6\triangle hEJ}{l^2}\\
\triangle M'' &= \triangle l\left(-\frac{EJk}{ln^2}\right)+\triangle\varphi'\left(-2+\frac{k^2}{n^2}-\frac{6c}{l}\right)\frac{EJ}{l}\\
&\quad +\triangle\varphi''\left(-4-\frac{k^2}{n^2}-\frac{6c}{l}\right)\frac{EJ}{l}-\frac{6\triangle hEJ}{l^2}
\end{aligned}\right\}\quad(68)$$

Zur Abkürzung wurde vorstehend

$$n^2 \text{ statt } u^2 - k^2 + i^2 \cos\varphi' \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (69)$$

gesetzt. Angenähert ist $n^2 = u^2 - k^2 + i^2$.

Die gesuchten Beiwerthe ergeben sich aus vorstehenden Gleichungen zu

$$\left.\begin{aligned}
&\alpha = -\frac{EJ}{ln^2};\quad \alpha' = \frac{EJk}{ln^2};\quad \alpha'' = -\frac{EJk}{ln^2};\\
&\beta = -\frac{EJk}{ln^2};\quad \beta' = \left(4 + \frac{k^2}{n^2} + \frac{6c}{l}\right)\frac{EJ}{l};\\
&\beta'' = \left(2 - \frac{k^2}{n^2} + \frac{6c}{l}\right)\frac{EJ}{l};\quad K' = \frac{6\triangle hEJ}{l^2};\\
&\gamma = -\frac{EJk}{ln^2};\quad \gamma' = \left(-2 + \frac{k^2}{n^2} - \frac{6c}{l}\right)\frac{EJ}{l};\\
&\gamma'' = \left(-4 - \frac{k^2}{n^2} - \frac{6c}{l}\right)\frac{EJ}{l};\quad K'' = -\frac{6\triangle hEJ}{l^2}
\end{aligned}\right\}(70)$$

Die vorstehende Zusammenstellung zeigt, dafs für ein und dieselbe Oeffnung

$$\alpha' = -\alpha'';\ \beta = -\alpha' = \alpha'';\ \beta = \gamma;\ \gamma'' = -\beta';\ \gamma' = -\beta'';\ K' = -K'',$$

was theils aus Gründen der Symmetrie, theils aus dem Satz von der Gegenseitigkeit der Verschiebungen von vornherein geschlossen werden kann.

Die Werthe von K' und K'' sind i. a. gering und können für gleichgebildete Pfeiler ohne weiteres gleich Null gesetzt werden.

Für Parabelbögen wird $u^2 = \frac{16f^2}{30}$, $k = \frac{2}{3}f$, somit

$$n^2 = u^2 - k^2 + i^2\cos\varphi' = \frac{4}{45}f^2 + i^2\cos\varphi'.$$

Bei Halbkreisgewölben sind die unteren Theile, die durch Hintermauerung mit einander verbunden sind (Abb. 13), als Bestandtheile der Pfeiler anzusehen; die eigentlichen, freien Gewölbe beginnen erst oberhalb der Hintermauerung. Infolge davon wird ihre in vorstehende Formeln einzuführende Spannweite l und namentlich ihr Pfeilverhältnifs $\frac{f}{l}$ vermindert, während anderseits die Pfeilerhöhe h entsprechend wächst. Das Pfeilverhältnifs $f:l$ dürfte unter gewöhnlichen Verhältnissen selten den Betrag $\frac{1}{3}$ bis $\frac{1}{4}$ überschreiten.

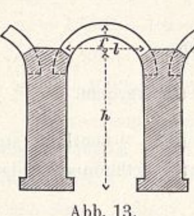


Abb. 13.

Für Fachwerkträger lauten die Beziehungsgleichungen zwischen $\triangle l$, $\triangle\varphi'$ und $\triangle\varphi''$ einerseits und den Lagerkräften $\triangle H$, $\triangle M'$ und $\triangle M''$ anderseits:

$$\left.\begin{aligned}
E(\triangle\varphi' - \triangle\varphi'') &= \triangle M'\Sigma\frac{s}{Fm^2} + \triangle G\Sigma\frac{sx}{Fm^2}\\
&\quad - \triangle H\Sigma\frac{sy}{Fm^2}\\
E(\triangle l - a\triangle\varphi'') &= \triangle M'\Sigma\frac{sy}{Fm^2} + \triangle G\Sigma\frac{syx}{Fm^2}\\
&\quad - \triangle H\Sigma\frac{sy^2}{Fm^2}\\
-E(\triangle a + l\triangle\varphi'') &= \triangle M'\Sigma\frac{sx}{Fm^2} + \triangle G\Sigma\frac{sx^2}{Fm^2}\\
&\quad - \triangle H\Sigma\frac{sxy}{Fm^2}
\end{aligned}\right\}(71)$$

Hierin bezeichnet F den Querschnitt, s die Länge eines Fachwerkstabes, x und y die Coordinaten seines Gegenpunktes, m die Länge der Normalen vom Gegenpunkt auf den Stab.

Die Summen beziehen sich streng genommen auf sämtliche Fachwerkstäbe, doch genügt es für gewöhnlich, wenn man nur die Gurtstäbe in die Summen einbezieht.

Ferner besteht die Beziehung

$$\triangle G = \frac{\triangle M'' - \triangle M' + a\cdot\triangle H}{l}$$

Für symmetrische Bögen kann man setzen:

$$\left.\begin{aligned}
&a = 0;\ \Sigma\frac{s}{Fm^2} = \frac{l}{Y}, \text{ wo } Y \text{ einen Mittelwerth von } Fm^2 \text{ darstellt,}\\
&\Sigma\frac{s}{Fm^2} = \frac{kl}{Y}, \text{ wo } k \text{ die Ordinate des Schwerpunktes der Gewichte } \frac{s}{Fm^2} \text{ darstellt, die in den betr. Gegenpunkten wirkend gedacht werden,}\\
&\Sigma\frac{sx}{Fm^2} = \frac{l^2}{2Y}, \text{ der Symmetrie wegen,}\\
&\Sigma\frac{syx}{Fm^2} = \frac{kl^2}{2Y}, \text{ " " "}\\
&\Sigma\frac{sx^2}{Fm^2} = \frac{w^2l}{Y}, \text{ wo } w^2 \text{ einen Mittelwerth von } x^2 \text{ darstellt,}\\
&\Sigma\frac{sy^2}{Fm^2} = \frac{u^2l}{Y}, \text{ wo } u^2 \text{ einen Mittelwerth von } y^2 \text{ darstellt.}
\end{aligned}\right\}(72)$$

Man erhält mit diesen Abkürzungen, wenn man noch $u^2 - k^2 = n^2$ und $w^2 - \frac{l^2}{4} = z^2$ setzt,

$$\left.\begin{aligned}
\triangle G &= -\frac{EY}{lz^2}\left[\triangle\varphi'\left(\frac{l}{2}+c\right) + \triangle\varphi''\left(\frac{l}{2}+c\right) + \triangle h\right]\\
\triangle H &= \frac{EY}{ln^2}[k(\triangle\varphi' - \triangle\varphi'') - \triangle l]\\
\triangle M' &= \frac{EY}{l}\left[-\triangle l\frac{k}{n^2} + \triangle\varphi'\left(1 + \frac{l^2}{4z^2} + \frac{k^2}{n^2} - \frac{lc}{2z^2}\right)\right.\\
&\quad\left. + \triangle\varphi''\left(-1 + \frac{l^2}{4z^2} - \frac{k^2}{n^2} + \frac{lc}{2z}\right) + \frac{\triangle hl}{2z^2}\right]\\
\triangle M'' &= \frac{EY}{l}\left[-\triangle l\frac{k}{n^2} + \triangle\varphi'\left(1 - \frac{l^2}{4z^2} + \frac{k^2}{n^2} - \frac{lc}{2z^2}\right)\right.\\
&\quad\left. + \triangle\varphi''\left(-1 - \frac{l^2}{4z^2} - \frac{k^2}{n^2} - \frac{lc}{2z^2}\right) - \frac{\triangle hl}{2z^2}\right]
\end{aligned}\right\}(73)$$

Die gesuchten Beiwerthe ergeben sich aus vorstehenden Gleichungen zu

$$\left.\begin{aligned}
&\alpha = -\frac{EY}{ln^2};\quad \alpha' = \frac{EYk}{ln^2};\quad \alpha'' = -\frac{EYk}{ln^2};\\
&\beta = -\frac{EYk}{ln^2};\quad \beta' = \frac{EY}{l}\left(1 + \frac{l^2}{4z^2} + \frac{k^2}{n^2} + \frac{lc}{2z^2}\right);\\
&\beta'' = \left(-1 + \frac{l^2}{4z^2} - \frac{k^2}{n^2} + \frac{lc}{2z}\right)\frac{EY}{l};\quad K' = \frac{\triangle h\cdot EY}{2z^2};\\
&\gamma = -\frac{EYk}{ln^2};\quad \gamma' = \frac{EY}{l}\left(1 - \frac{l^2}{4z^2} + \frac{k^2}{n^2} - \frac{lc}{2z^2}\right);\\
&\gamma'' = \frac{EY}{l}\left(-1 - \frac{l^2}{4z^2} - \frac{k^2}{n^2} - \frac{lc}{2z}\right);\quad K'' = -\frac{\triangle h\cdot EY}{2z^2}
\end{aligned}\right\}(74)$$

Der Augenschein zeigt, dafs $\alpha' = -\alpha'' = -\beta = -\gamma$; $\gamma'' = -\beta'$; $\gamma' = -\beta''$; $K' = -K''$.

Auch hier kann das unter IIa beschriebene Näherungsverfahren zur Lösung der Grundgleichungen (52) und (52[a]) bezw. (53) und (53[a]) angewandt werden, bei welchem immer

nur drei Oeffnungen der gleichzeitigen Betrachtung unterzogen werden.

Handelt es sich nur um eine einzige Oeffnung mit elastischen Endpfeilern, so ist jede der zwei Grundgleichungen auf jeden der beiden Endpfeiler anzuwenden; man erhält vier Gleichungen mit vier Unbekannten, bezw. bei symmetrischem Bogen und symmetrischer Belastung zwei Gleichungen mit zwei Unbekannten.

Die Grundgleichungen dienen auch dazu, den Einfluſs von Wärmeänderungen auf die Formänderungen und die Aenderungen der Lagerkräfte zu bestimmen, wenn man unter H, M', M'' und T die Lagerkräfte, welche den Wärmeänderungen bei starren Pfeilern entsprechen, einführt. Bei gleichartigen Verhältnissen und starren Endpfeilern werden selbstverständlich alle $\triangle v$ und $\triangle \varphi$ und somit auch alle Kraftänderungen $\triangle H$, $\triangle M'$ und $\triangle M''$ gleich Null.

Die Grundgleichungen sollen nun auf eine Brücke mit drei gleichartigen Oeffnungen und starren Endpfeilern angewandt werden (Abb. 8). Die mittlere Oeffnung ist voll belastet, die Seitenöffnungen sind unbelastet. Man hat

$$\triangle v_r = \triangle v,\quad \triangle v_{r-1} = -\triangle v,\quad \triangle v_{r+1} = 0,$$

$$\triangle \varphi_r = \triangle \varphi,\quad \triangle \varphi_{r-1} = -\triangle \varphi,\quad \triangle \varphi_{r+1} = 0.$$

$$H_{r-1} = H_2 = eH + vH = \frac{(g+p)l^2}{8fm},\quad \text{wo } m = 1 + \frac{45 i^2}{4f^2} \text{ für}$$

flache Parabelbogen,

$$H_r = H_3 = eH = \frac{gl^2}{8fm}.$$

$$M''_{r-1} = M''_2 = eM + vM'' = -\frac{45(g+p)l^2 i^2}{48 f^2 m}$$

$$M'_r = M'_3 = eM = -\frac{45 g l^2 i^2}{48 f^2 m},\ \text{wobei für Eigengewicht}$$

$eM' = eM'' = eM$ gesetzt wurde.

$$T_r = T_3 = vT = -vC\cdot c = -\frac{pl}{2}\cdot c.$$

Ferner sei $K'' = K' = 0$.

Die zwei zur Bestimmung der zwei Unbekannten $\triangle v$ und $\triangle \varphi$ erforderlichen Gleichungen erhält man nach Einsetzen vorstehender Werthe in die zwei allgemeinen Grundgleichungen (53) und (53ᵃ) zu

$$\triangle v(\varrho - 3\alpha) + \triangle \varphi(\lambda - 3\beta) = vH,$$

$$\triangle v(\mu - 3\beta) + \triangle \varphi(\nu + 2\beta' + \gamma') = vM + vT,$$

woraus sich ergiebt

$$\left.\begin{aligned}\triangle v &= [vH(\nu + 2\beta' + \gamma') - (vM + vT)(\lambda - 3\beta)]:\\ &\quad :[(\varrho - 3\alpha)(\nu + 2\beta' + \gamma') - (\mu - 3\beta)(\lambda - 3\beta)]\\ \triangle \varphi &= [vH(\mu - 3\beta) + (vM + vT)(\varrho - 3\alpha)]:\\ &\quad :[(\varrho - 3\alpha)(\nu + 2\beta' + \gamma') - (\mu - 3\beta)(\lambda - 3\beta)]\end{aligned}\right\} \quad (75)$$

Ferner sind die geänderten Bogenkräfte

$$\mathfrak{H}_2 = 2\alpha \triangle v + \triangle \varphi(-\alpha' + \alpha'') + eH + vH,$$

$$= 2\alpha \triangle v - 2\alpha' \triangle \varphi + eH + vH,\ \text{da } \alpha' = -\alpha'';$$

$$\mathfrak{H}_3 = -\alpha \triangle v + \alpha' \triangle \varphi + eH,$$

$$\mathfrak{M}_2'' = 2\gamma \triangle v + \triangle \varphi(-\gamma' + \gamma'') + eM + vM'',$$

$$\mathfrak{M}_3' = -\beta \triangle v + \beta' \triangle \varphi + eM,$$

und die Pfeilerkräfte

$$R_3 = \mathfrak{H}_2 - \mathfrak{H}_3 = \triangle v\cdot 3\alpha - \triangle \varphi \cdot 3\alpha' + vH \text{ oder auch}$$

$$R_3 = \varrho \triangle v + \lambda \triangle \varphi,$$

$$N_3 = \mathfrak{M}_2'' - \mathfrak{M}_3' + T_3 = \triangle v(2\gamma + \beta) + \triangle \varphi(-\gamma' + \gamma'' - \beta') + vM'' + vT \text{ oder auch}$$

$$N_3 = \mu \triangle v + \nu \triangle \varphi.$$

Die ursprünglichen Randspannungen σ_1 und σ_2 eines beliebigen Bogenquerschnittes ändern sich um

$$\nu_1 = \frac{-\triangle H \mathfrak{D}_1 + \triangle M}{W_x} \text{ und } \nu_2 = \frac{\triangle H \mathfrak{D}_2 - \triangle M}{W_x},$$

wo $\mathfrak{D}_1$ und $\mathfrak{D}_2$ die Ordinaten der entsprechenden Kernpunkte bezeichnen.

Die geänderten Randspannungen sind $\bar{\sigma}_1 = \sigma_1 + \nu_1$, $\bar{\sigma}_2 = \sigma_1 + \nu_2$.

Zahlenbeispiel 5 (drei Steinbögen von 10 m Stützweite).

Unter Beibehaltung der in Beispiel 3 angegebenen Grundmaſse erhält man

$$vH = 1900 \text{ kg},\ eH = 11\,400 \text{ kg},\ vC = 2000 \text{ kg},$$

$$eC = 12\,000 \text{ kg},\ vT = -300\,000 \text{ kg/cm},\ vM' = vM''$$

$$= -17\,000 \text{ kg/cm},\ eM' = eM'' = -102\,000 \text{ kg/cm},$$

alle Kräfte auf 1 m Breite bezogen,

$$k = \frac{2}{3} = 167 \text{ cm},\ u^2 = \frac{16 f^2}{30} = 33333,\ i^2 = 300,\ n^2 = 5800,$$

$$\alpha = -31\,000,\ \alpha' = 5\,180\,000,\ \alpha'' = -5\,180\,000,$$

$$\beta = -5\,180\,000,\ \beta' = 1\,750\,000\,000,\ \beta'' = -340\,000\,000,$$

$$\gamma = -5\,180\,000,\ \gamma' = 340\,000\,000,\ \gamma'' = -1\,750\,000\,000,$$

für $\eta = 20$ ist

$$\varrho = 4725,\ \mu = \lambda = -6\,750\,000,\ \nu = 11\,700\,000\,000.$$

Mit Hülfe der Gleichung (75) ergeben sich

$$\triangle v = 0{,}0224,\ \triangle \varphi = -0{,}000033,$$

$$\triangle H_2 = 2\alpha \triangle v + \triangle \varphi(-\alpha' + \alpha'') = -1047 \text{ kg},$$

$$\triangle M_2 = 2\gamma \triangle v + (-\gamma' + \gamma'')\triangle \varphi = -163\,100 \text{ kg/cm},$$

$$R_3 = \varrho \triangle v + \lambda \triangle \varphi = 330 \text{ kg},$$

$$N_3 = \mu \triangle v + \nu \triangle \varphi = -537\,300 \text{ kg}.$$

Das Moment bezüglich der Pfeilersohle beträgt

$$M_0 = Rh + N = 122\,700 \text{ kg/cm}.$$

Die entsprechenden Randspannungen sind

$$\sigma = \pm \frac{M_0}{\mathfrak{W}_0} = \pm \frac{122\,700}{1\,600\,000} = \pm 0{,}08 \text{ kg/qcm}.$$

Die Pfeilersohle wird hiernach nicht wesentlich auf Biegung in Anspruch genommen; die Druckvertheilung erfolgt nahezu gleichmäſsig.

Die Aenderungen der Bogenkräfte $\triangle H$ und $\triangle M$ rufen Aenderungen der Spannungen im Bogen hervor. Für den Kämpferquerschnitt sind die Aenderungen der Randspannungen

$$\nu_1 = \cos\varphi' \frac{\triangle H}{F} + \frac{\triangle M}{W} = -\frac{735}{7200} - \frac{163\,100}{86\,400}$$

$$= -0{,}1 - 1{,}9 = -2 \text{ kg/qcm und}$$

$$\nu_2 = -0{,}1 + 1{,}9 = +1{,}8 \text{ kg/qcm}.$$

Bei starren Pfeilern wären die Randspannungen

$$\sigma_1 = \frac{H\cos\varphi' + C\sin\varphi'}{F} + \frac{M}{W} = 1{,}88 - 1{,}38 = 0{,}5 \text{ kg/qcm}$$

und $\sigma_2 = 1{,}88 + 1{,}38 = 3{,}26$ kg/qcm.

Die Gesamtspannungen sind hiernach

$$\bar{\sigma}_1 = \sigma_1 + \nu_1 = 0{,}5 - 2 = -1{,}5 \text{ und}$$

$$\bar{\sigma}_2 = \sigma_2 + \nu_2 = 3{,}26 + 1{,}8 = 5{,}06 \text{ kg/qcm}.$$

Für den Scheitelquerschnitt wird

$$\nu_1 = \frac{\triangle H}{F} + \frac{\triangle M - \triangle H\cdot f}{W} = -\frac{1047}{6000}$$

$$+ \frac{-163100 + 1047\cdot 250}{60\,000} = -0{,}17 + 1{,}64 = 1{,}47 \text{ kg/qcm},$$

$$\nu_2 = -0{,}17 - 1{,}64 = -1{,}81 \text{ kg/qcm}.$$

Bei starren Pfeilern wären die Randspannungen $\sigma_1 = \frac{H}{F} + \frac{M}{W}$ $= 2{,}22 + 0{,}93 = 3{,}15$ kg/qcm und $\sigma_2 = 2{,}22 - 0{,}93 = 1{,}29$ kg; somit betragen die Gesamtspannungen

$\bar{\sigma}_1 = \sigma_1 + \nu_1 = 3{,}15 + 1{,}47 = 4{,}62$ kg/qcm und

$\bar{\sigma}_2 = \sigma_2 + \nu_2 = 1{,}29 - 1{,}81 = -0{,}52$ kg/qcm.

Infolge der Nachgiebigkeit der Pfeiler erhalten hiernach die oberen Punkte des Kämpferquerschnittes und die unteren Punkte des Scheitelquerschnittes Zugspannungen.

Bei einer Wärmeerniedrigung von t Grad ändert sich der Bogenschub um $H_t = -\frac{45 EJ\omega t}{4f^2 m}$ und das Einspannungsmoment um $M_t = -\frac{7{,}5 EJ\omega t}{fm}$, wo $m = 1 + \frac{45 i^2}{4f^2}$.

Für $t = 20^0$, $\omega = \frac{1}{80000}$ wird $H_t = -7700$ kg und $M_t = -1280000$ kg/cm.

Die entsprechenden Wärmespannungen betragen für den Kämpferquerschnitt $\tau_1 = -15{,}56$ kg und $\tau_2 = 14{,}06$ kg, und für den Scheitelquerschnitt $\tau_1 = 6{,}80$ kg und $\tau_2 = -9{,}36$ kg. Auch hier zeigen sich τ_1 und τ_2 unabhängig von der Querschnittgröſse F und dem Trägheitsmoment J, dagegen abhängig von e und i^2.

Die Gesamtspannungen wären bei starren Pfeilern für den Kämpferquerschnitt

$\bar{\sigma}_1 = \sigma_1 + \tau_1 = 0{,}5 - 15{,}56 = -15{,}06$ und $\bar{\sigma}_2 = 3{,}26 + 14{,}06 = 17{,}32$ kg; für den Scheitelquerschnitt

$\bar{\sigma}_1 = 3{,}15 + 6{,}8 = 9{,}95$ und $\bar{\sigma}_2 = 1{,}29 - 9{,}36 = -8{,}07$ kg.

Bei nachgiebigen Pfeilern steigen sie auf

$\bar{\sigma}_1 = -15{,}06 - 2 = -17{,}06$ und

$\bar{\sigma}_2 = 17{,}32 + 1{,}8 = 19{,}12$ kg/qcm, bezw. auf

$\bar{\sigma}_1 = 9{,}95 + 1{,}47 = 11{,}42$ und

$\bar{\sigma}_2 = -8{,}07 - 1{,}81 = 9{,}88$ kg/qcm.

Diese Gesamtspannungen sind gröſser als die entsprechenden bei Bögen mit zwei Gelenken (Beispiel 3). Sie werden hauptsächlich durch die bedeutende Höhe der Wärmespannungen bedingt, während die durch die Nachgiebigkeit der Pfeiler verursachten Nebenspannungen ν weniger ins Gewicht fallen. Die Widerstandskraft des Mörtels ist bei den gewöhnlichen Ausführungsweisen den berechneten hohen Spannungen nicht gewachsen; es treten demgemäſs bei groſser Kälte Risse und zwar zunächst in dem oberen Theile der Kämpferfugen auf. Im Zusammenhang damit bildet sich ein ganz anderer Formänderungs- und Spannungszustand, als wie bei Aufstellung der Formeln vorausgesetzt worden war. Die gröſsten Druckspannungen steigen hierbei über den oben berechneten Betrag von 19,12 kg/qcm. (Sieh hierüber Abschnitt IV.)

b) Die Aenderungen $\triangle l$ und $\triangle f$ werden berücksichtigt.

Wenn man statt der planmäſsigen Längen l und f die dem endgültigen Gleichgewichtszustand entsprechenden $l + \triangle l$ und $f + \triangle f$ in die Formel für den Bogenschub einführt, so erhält man, wie unter IIb näher angegeben, eine Vergröſserung desselben:

$$\triangle H = \frac{\triangle l}{l}\left(1 + \frac{3 l^2}{16 f^2}\right) = \delta \frac{\triangle l}{l} \quad . \quad . \quad (45)$$

In ähnlicher Weise ergeben sich die Aenderungen der Einspannungsmomente zu

$$\left.\begin{aligned} \triangle M' &= -\frac{\triangle l}{l}\left(1 + \frac{3l^2}{8f^2}\right) = -\frac{\delta' \triangle l}{l} \\ \triangle M'' &= -\frac{\triangle l}{l}\left(1 + \frac{3l^2}{8f^2}\right) = -\frac{\delta'' \triangle l}{l} \end{aligned}\right| \quad . \quad . \quad (76)$$

Diese Aenderungen sind mit den früher unter IIIa berechneten $\alpha \triangle l$, $\beta \triangle l$, $\gamma \triangle l$ zusammenzusetzen, welche die Aenderung der Bogenwirkung infolge Ausweichens der Widerlager zum Ausdruck bringen. Die Gesamtänderungen von H, M' und M'', die von der Spannweitenänderung $\triangle l$ abhängen, sind hiernach

$$\left.\begin{aligned} \triangle H &= \left(\alpha + \frac{\delta}{l}\right)\triangle l = \mathfrak{a} \triangle l, \text{ wo } \mathfrak{a} = \alpha + \frac{\delta}{l} \\ \triangle M' &= \left(\beta + \frac{\delta'}{l}\right)\triangle l = \mathfrak{b} \triangle l, \text{ wo } \mathfrak{b} = \beta + \frac{\delta'}{l} \\ \triangle M'' &= \left(\gamma + \frac{\delta''}{l}\right)\triangle l = \mathfrak{c} \triangle l, \text{ wo } \mathfrak{c} = \gamma + \frac{\delta''}{l} \end{aligned}\right| \quad . \quad (77)$$

Bei schärferer Rechnung sind nun die Gröſsen $\mathfrak{a}$, $\mathfrak{b}$, $\mathfrak{c}$ statt α, β, γ in die Grundgleichungen (75) einzuführen; doch sind die Unterschiede so gering, daſs man i. a. von einer solchen Berichtigung absehen kann.

IV. Aenderungen des Kräfteplanes bei Gewölben infolge der Veränderlichkeit der Elasticitätsziffer E und infolge von Riſsbildungen.

Die bisher entwickelten Formeln beruhen auf der Voraussetzung einer unveränderlichen Elasticitätsziffer, d. h. auf der linearen Beziehung $\sigma = E\varepsilon$ zwischen Spannung und Dehnung. In Wirklichkeit ist jedoch für Stein, Mörtel, Mauerwerk diese Beziehung weniger einfach; die Spannungen wachsen langsamer, als die Dehnungen, und für Druck in anderer Weise, als für Zug. Näherungsweise läſst sich die betreffende Beziehung durch eine Potenzengleichung $\sigma = C\varepsilon^n$ ausdrücken (sieh Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure 1898, S. 903), wo die Unveränderlichen C und n vom Material abhängig und für Druck und Zug verschieden sind. Der Werth von n liegt zwischen 1 und 0,5.

Die Ergebnisse, welche bei Anwendung der Potenzengleichung an Stelle der linearen erhalten werden, zeigen in doppelter Hinsicht Abweichungen; einmal bezüglich der äuſseren, statisch unbestimmbaren Gröſsen $H M' M'' R$ und dann bezüglich der inneren Spannungen σ. Die erstgenannte Abweichung ist von geringerer Bedeutung und kann vernachlässigt werden; es erscheint zulässig, die statisch unbestimmbaren Gröſsen und die davon abhängigen Kräfte und Kraftmomente, die auf die einzelnen Querschnitte einwirken, mit den bisherigen Formeln, die auf $\sigma = E\varepsilon$ beruhen, zu berechnen. Was den zweiten Punkt anbelangt, die Bestimmung der inneren Spannungen eines Querschnittes, die den äuſseren Kräften das Gleichgewicht halten müssen, so kann man auch hier in den Fällen der Anwendung unbedenklich die lineare Spannungsvertheilung, welche der Gleichung $\sigma = E\varepsilon$ entspricht, zu Grunde legen, so lange es sich nur um Spannungen von einerlei Sinn im Querschnitt handelt. Dies ist der Fall bei den Pfeilern und bei richtig angeordneten Gewölben unter normalen Verhältnissen. Kommen gleichzeitig Zug- und Druckspannungen im Querschnitt vor, so sind die Abweichungen gröſser, und zwar fallen die wirklichen Gröſst-

werthe geringer aus, als sich bei linearer Spannungsvertheilung ergeben würde.

Die genaue Ermittlung der einzelnen Spannungen, insbesondere ihrer Gröſstwerthe, ist jedoch äuſserst umständlich (sieh a. a. O. S. 927) und auſserdem mangels ausreichender Kenntniſs der Gröſse C und n von geringem praktischen Werth. Es bleibt zur Zeit für die Fälle der Anwendung nichts anderes übrig, als wie bisher die Gröſstwerthe σ_1 und σ_2 unter der Voraussetzung $\sigma = E\varepsilon$ zu berechnen und die zulässigen Beanspruchungen bezw. die Festigkeitsziffern auf der gleichen Grundlage abzuleiten. Bei diesem Verfahren erhält man sowohl die Spannungen σ_1 und σ_2 als auch die Bruchfestigkeit zu groſs; ihr gegenseitiges Verhältniſs, und das ist die Hauptsache, wird jedoch von dem wirklichen Verhältniſs nur wenig abweichen, und zwar umsoweniger, je mehr die Bedingungen des Bruchversuchs mit denen des Gebrauchsfalles übereinstimmen.

Bei den im groſsen Maſsstab an wirklichen Gewölben angestellten Bruchversuchen des Oesterr. Ingenieur- und Architekten-Vereins (sieh Vereinszeitschrift 1895) ergeben sich folgende Mittelwerthe für die Bruchfestigkeit

$K = 8{,}5$ kg/qcm bei Bruchsteingewölben,
$K = 5$ „ „ Ziegelgwölben,
$K = 20$ „ „ Betongewölben,

welche Zahlen auf Grund der Gleichung $\sigma = E\varepsilon$ mit Hülfe der Gleichung $K = M : W$ ermittelt wurden.

Eine besondere Betrachtung erfordert noch der Umstand, daſs die Dehnungen des Mauerwerks keineswegs, wie bisher angenommen, vollkommen elastische sind, sondern daſs nach Aufhören der Spannungen Dehnungen (bezw. Zusammenpressungen) zurückbleiben. Bezeichnet man die elastische Dehnung mit ε, die gesamte, einschlieſslich der bleibenden mit η, so läſst sich nicht nur die Beziehung zwischen σ und ε, sondern auch die zwischen σ und η durch eine Potenzengleichung ausdrücken,

$$\sigma = C\varepsilon^n \text{ und } \sigma = \mathfrak{C}\eta^n.$$

Näherungsweise können diese Gleichungen durch die linearen Beziehungen $\sigma = E\varepsilon$ und $\sigma = E_1\eta$ ersetzt werden.

Wenn nun das Mauerwerk einer einmaligen Belastung ausgesetzt wird, so ist der eintretende Formänderungs- bezw. Spannungszustand auf Grund der Gleichung $\sigma = E_1\eta$, anstatt der Gleichung $\sigma = E\varepsilon$ zu berechnen. Die früher erhaltenen Ergebnisse sind ohne weiteres brauchbar, wenn man nur an Stelle der Elasticitätsziffer E den Werth E_1 einführt. Dies ist insofern bereits stillschweigend geschehen, als die auf S. 314 angegebenen Zahlenwerthe von E strenggenommen Werthe von E_1 darstellen, da sie nicht auf Grund der elastischen Dehnungen, sondern auf Grund der gesamten Dehnungen bestimmt worden sind.

Wird das Mauerwerk wieder entlastet, so bleiben Formänderungen, und wenn die Anordnung statisch unbestimmt ist, zum Theil auch geringe Spannungen zurück. Bei Wiederholung der gleichen Belastungen tritt der frühere Formänderungs- und Spannungszustand wieder ein, sofern keine neuen bleibenden Dehnungen entstehen. Ist letzteres jedoch der Fall, so wird die gesamte Formänderung entsprechend gröſser und der zugehörige Werth von E_1 entsprechend kleiner. Bezeichnet man den Grenzwerth, welchen die Gröſse E_1 bei n-maliger Wiederholung der Belastung erreicht, mit E_n, wobei die Gesamtdehnung sich stets auf die ursprüngliche Länge bezieht, so läſst sich der endgültige Formänderungs- und Spannungszustand annähernd so berechnen, als handle es sich nur um eine einmalige Belastung und habe die Elasticitätsziffer den Werth E_n.

Leider sind z. Z. noch keine Versuchsergebnisse vorhanden, aus denen das Verhältniſs der Gröſsen E, E_1 und E_n bestimmt werden könnte.

Wird die Bruchfestigkeit des Mauerwerks überschritten, wobei entweder die Adhäsion des Mörtels, wie bei den Bruchstein- und Ziegelsteingewölben, oder die Cohäsion desselben, wie bei den Betongewölben, überwunden wird, so treten Risse im Gewölbe auf. Die in deren Bereich liegenden Bogentheile werden spannungslos und üben auf die Formänderung des Gewölbes keinen Einfluſs mehr aus (in Abb. 14 schraffirt). Der Bogen verbiegt sich so, als ob diese Theile gar nicht vorhanden wären. Dieser neuen Verbiegung entsprechend stellt sich ein ganz neuer Kräfteplan her. Bogenschub H und Einspannungsmomente M' und M'' ändern ihre Gröſse; die auf die verkleinerten Querschnitte einwirkenden äuſseren Kräfte ändern dementsprechend gleichfalls ihre Gröſse und ihren Angriffspunkt, und zwar in einer für den Bestand des Gewölbes günstigen Weise, sodaſs trotz des verringerten Widerstandsmomentes und Querschnittes ein neuer Gleichgewichtszustand eintreten kann, der allerdings gröſsere Druckbeanspruchungen im Gefolge hat, als wie solche vor Auftreten der Risse im vollen Querschnitt vorhanden waren. Selbstverständlich ist hierzu eine ausreichende Druckfestigkeit des Mauerwerkes, welche dessen Zugfestigkeit weit übertrifft, erforderlich.

Legen wir zunächst den ungünstigsten Fall der Betrachtung zu Grunde, daſs nämlich das Mauerwerk nur Druckspannungen, aber keinerlei Zugspannungen auszuhalten imstande wäre, so läſst sich der neue Kräfteplan in folgender Weise durch Probiren bestimmen, wobei der Einfachheit wegen symmetrische Verhältnisse vorausgesetzt werden (Abb. 14).

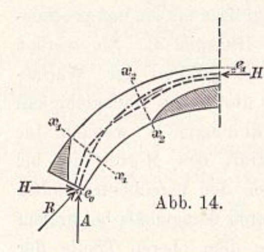


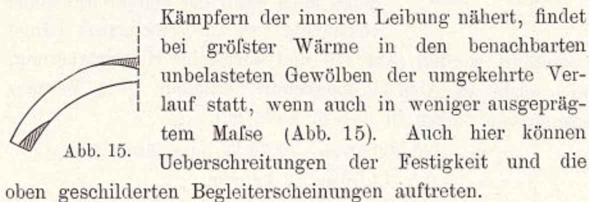
Abb. 14.

Man nimmt die Punkte, in denen die Stützlinie den Scheitelquerschnitt und Kämpferquerschnitt trifft, bezw. deren Entfernungen e_1 und e_0 von dem benachbarten Rande an, bestimmt hieraus den Bogenschub H und zeichnet sodann die zugehörige Stützlinie. Bezeichnet man mit e die jeweiligen Entfernungen der Stützlinie vom benachbarten Rande, so erstreckt sich die wirksame Fugenhöhe jeweils auf die Länge $3e$, so lange $3e$ kleiner als die Gesamthöhe d ist. Auſserhalb der hierdurch bedingten Grenzlinie befindet sich der unwirksame, in Abb. 14 schraffirte Bogentheil. Auf der mittleren Strecke $x_1 - x_2$ bleiben die ursprünglichen Querschnitte und die ursprüngliche Bogenmittellinie; auf der Strecke $o - x_1$ liegt die neue Mittellinie um $1{,}5\,e$ vom inneren, auf der Strecke $x_2 - \frac{l}{2}$ um $1{,}5\,e$ vom äuſseren Bogenrand entfernt. Für den so bestimmten neuen Bogenkörper mit seiner theilweise neuen Mittellinie und seinem zum Theil geminderten Querschnitte sind nun in bekannter Weise der Bogenschub H, das Einspannungs-

moment M' und die zugehörigen Gröſsen e_0 und e_1 zu berechnen. Stimmen die erhaltenen Werthe nicht mit den gemachten Annahmen überein, so ist das Verfahren solange zu wiederholen, bis eine genügende Uebereinstimmung erzielt ist. Die gröſsten Randspannungen (Druckspannungen) sind sodann im Scheitel $\sigma_1 = \frac{2H}{3e_1}$ und am Kämpfer $\sigma_2 = \frac{2R \sin.\psi}{3e_0}$, wo $R = \sqrt{A^2 + H^2}$ und ψ = Winkel zwischen der Normalkraft R und dem Querschnitt.

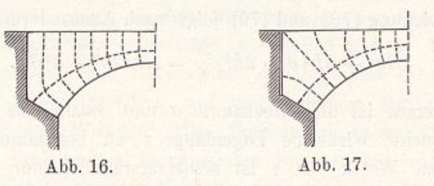
Für sehr kleine e_0 und e_1 erhält man dann denselben Kräfteplan, wie bei einem Dreigelenkbogen, dessen Gelenke am Scheitel in der äuſseren und an den Kämpfern in der inneren Leibung liegen. Ueberschreitet die Randspannung σ in den am meisten gefährdeten Fugen (Bruchfugen) die Druckfestigkeit (Rand-Druckfestigkeit) des Mauerwerkes, so wird daselbst das Material zerdrückt, wobei mehr oder minder groſse Theilchen absplittern können und die wirksame Strecke der Fuge vom Rand abrückt. Gleichzeitig erhöht sich die Druckfestigkeit des Mauerwerkes (Innen-Druckfestigkeit), da bekanntlich die Widerstandsfähigkeit eines Prismas gegen Druckkräfte gröſser ist, wenn letztere im Inneren, als wenn sie am Rande der Grundflächen angreifen. Auf diese Weise findet eine Selbstregelung der Spannungsverhältnisse in den Bruchfugen statt, indem sich die Druckmittelkraft bezw. die Stützlinie soweit ins Innere des Mauerwerkes zurückzieht, bis sich letzteres als genügend widerstandsfähig erweist.

Während bei gröſster Kälte und bei belastetem Gewölbe sich die Stützlinie im Scheitel der äuſseren und an den Kämpfern der inneren Leibung nähert, findet bei gröſster Wärme in den benachbarten unbelasteten Gewölben der umgekehrte Verlauf statt, wenn auch in weniger ausgeprägtem Maſse (Abb. 15). Auch hier können Ueberschreitungen der Festigkeit und die oben geschilderten Begleiterscheinungen auftreten.


Abb. 15.

Das vorstehend beschriebene Verhalten der Gewölbe, wonach sich die Stützlinie dem jeweiligen Bedarf entsprechend verlegt, kommt umsomehr zum Ausdruck, je nachgiebiger die Pfeiler sind. Bei groſser Kälte und im unbelasteten Zustande nähern sich in sämtlichen Oeffnungen die Stützlinien dem oberen Rand der Scheitelfuge und dem unteren Rand der Kämpferfugen, wobei sich die Fugen entsprechend öffnen. Der Kräfteplan ist annähernd so, wie wenn Gelenke an den betr. Randstellen vorhanden wären. Wird nun eine der Oeffnungen belastet, so findet die Formänderung der Pfeiler zunächst annähernd so statt, wie bei Dreigelenkbogen. Die schlanken Zwischenpfeiler biegen sich so weit aus, bis sich die Fugen der unbelasteten Gewölbe schlieſsen. Von jetzt ab wirken die unbelasteten Gewölbe wie normale Zweigelenkbögen bezw. wie gelenklose Bögen. Ihre Formänderungen bleiben äuſserst gering, ihre Stützlinie wird flacher und ihr Bogenschub entsprechend gröſser. Der endgültige Gleichgewichtszustand liegt zwischen den unter I und II bezw. III näher beschriebenen. Da die Bewegungen der nachgiebigen Pfeiler durch den kräftigen Widerstand der unbelasteten Gewölbe in engen Grenzen gehalten werden, so werden die Beanspruchungen der Pfeiler in der Regel geringer sein, als unter Ia für starre Pfeiler berechnet. Ein Ausknicken der Pfeiler, wie dies nach Ib bei Dreigelenkbogen vorkommen kann, erscheint hier ausgeschlossen.

Durch Stirnmauern und Längsmauern mit Quergewölbchen werden Querschnitt und Trägheitsmoment des Gewölbes vergröſsert. Stehen diese Theile mit den Pfeilern bezw. den Nachbargewölben in fester Verbindung, so sind für die Berechnung Bogenachse und Bogenquerschnitte etwa wie in Abb. 16 eingezeichnet anzunehmen. Die Bogenachse ist flacher als die des eigentlichen Gewölbes, die Wärmespannungen fallen infolge der Versteifungen sehr bedeutend aus und überschreiten nächst den Pfeilern in der Regel die Zugfestigkeit des Mauerwerks, sodaſs ein mehr oder minder unregelmäſsiger Riſs von oben bis ins eigentliche Gewölbe erfolgt. Diesem Verhalten kann man schon bei der Ausführung des Bauwerkes Rechnung tragen, indem man eine offene Fuge zwischen dem Pfeiler und den Versteifungsmauern herstellt. In Abb. 17 sind Bogenachse und Bogenquerschnitte eingezeichnet, wie sie etwa für diesen Fall anzunehmen sind. Hier ist die Pfeilhöhe gröſser, die Bogenachse gewölbter, die Querschnitte gegen die Kämpfer hin schwächer als im vorigen Fall, sodaſs sich der Bogen stärker verbiegt und mit geringeren Beanspruchungen sich der erforderlichen Formänderung unterzieht.


Abb. 16. Abb. 17.

Kann das Mauerwerk Zugspannungen aufnehmen, so werden sich, auch wenn die Stützlinie aus dem Kern*) des Querschnittes heraustritt, die betr. Fugen noch nicht öffnen. Dies geschieht erst, wenn die Zugfestigkeit des Mauerwerkes überschritten wird. Es bildet sich dann ein neuer Gleichgewichtszustand, wobei die Fugen so weit geschlossen bleiben, als dies der Zugfestigkeit bezw. der Adhäsion des Mörtels entspricht. Diese „Innenfestigkeit" ist geringer, als die gewöhnliche Zugfestigkeit, wie sie am Rande eines Querschnittes zur Erscheinung kommt, da bei theilweise geöffneten Fugen ein ungünstigerer Spannungszustand herrscht, als in Vollkörpern. Man wird daher zur Sicherheit mit einer schätzungsweise verringerten Festigkeit rechnen. Der endgültige Kräfteplan ist in ähnlicher Weise, wie oben für den Grenzfall, Zugfestigkeit gleich Null, angegeben, durch Probiren zu bestimmen. Man nimmt vorläufig Gröſse und Lage von H und R an, ermittelt die zugehörige Stützlinie und die Gröſse der wirksamen Querschnitte und hieraus dann rückwärts die entsprechenden Bogenkräfte HM' und M'', wobei i. a. ein mehrfaches Probiren erforderlich wird. Zur Bestimmung der wirksamen Fugenlänge x, wenn der Abstand e der Stützlinie vom Bogenrand und die Gröſse der Normalkraft N bekannt sind, stellt man die zwei Gleichgewichts-

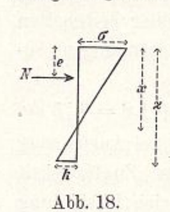


Abb. 18.

*) Die Kernweite wird auf Grund der Gleichung $\sigma = E\varepsilon$ zu $2w = \frac{1}{3}d$ erhalten. Auf Grund der Potenzengleichung ergiebt sie sich annähernd zu $\frac{1}{3,5}d$ (s. Zeitschr. d. V. Deutsch. Ing. 1898, S. 906).

bedingungen, Summe der Normalkräfte und Summe der Drehmomente um den Rand gleich Null, auf. Mit den Bezeichnungen der Abb. 18, wo $K =$ Zugfestigkeit, erhält man

$$x = z\frac{\sigma}{\sigma + k}, \quad z - x = z\frac{k}{\sigma + k},$$

$$\left.\begin{aligned} \frac{N}{b} &= \frac{\sigma x}{2} - \frac{k(z-x)}{2} = \frac{\sigma^2 z}{2(\sigma+k)} - \frac{k^2 z}{2(\sigma+k)}, \\ \text{woraus}\quad z &= \frac{2N(\sigma+k)}{b(\sigma^2-k^2)} = \frac{2N}{(\sigma-k)b} \end{aligned}\right\} \quad (78)$$

$$\frac{Ne}{b} = \frac{\sigma x^2}{6} + \frac{k(z-x)}{2}\left[x + \frac{2}{3}(z-x)\right] = \frac{z^2(\sigma^3 + 3k^2\sigma + 2k^3)}{6(\sigma+k)^2} \quad (79)$$

Aus Gleichung (78) und (79) folgt nach Aussonderung von z

$$(\sigma^3 + 3k^2\sigma + 2k^3)\frac{N}{b} = 1{,}5\,e(\sigma^2 - k^2)^2 \quad . \quad . \quad (80)$$

Hieraus ist die Unbekannte σ und sodann aus Gl. (78) die gesuchte wirksame Fugenlänge z zu bestimmen. Der gefundene Werth von z ist selbstverständlich nur so lange von Bedeutung, als er sich kleiner als die gesamte Fugenlänge d ergiebt. Die Mittellinie des wirksamen Bogentheiles liegt um $\frac{z}{2}$ vom betreffenden Bogenrand entfernt.

Es möge an dieser Stelle noch etwas näher auf die bei Gewölben besonders wichtigen Wärmeeinflüsse und auf die Abhängigkeit der Riſsgefahr von der Beschaffenheit des Gewölbestoffes und von der Gewölbeform eingegangen werden.

Verwendet man einen anderen Baustoff, wie den in den bisherigen Beispielen vorausgesetzten, für welchen $E = 100000$, $\omega = \frac{1}{80000}$, also $E\omega = 1{,}25$ angenommen worden war, so werden die Wärmespannungen $\frac{E\omega}{1{,}25}$ mal so groſs. Für Ziegelgewölbe kann man setzen $E\omega = 30000 \cdot 0{,}000005 = 0{,}15$. Die Wärmespannungen werden daher nur $\frac{0{,}15}{1{,}25} = 0{,}12$ mal so groſs als wie oben berechnet und erhalten für den Kämpferquerschnitt die Werthe

$\tau_1 = -0{,}12 \cdot 15{,}56 = -1{,}87$ kg/qcm und
$\tau_2 = 0{,}12 \cdot 14{,}96 = 1{,}69$ kg/qcm.

Die Gesamtspannungen steigen bei starren Pfeilern auf

$\bar{\sigma}_1 = 0{,}5 - 1{,}87 = -1{,}37$ kg u. $\bar{\sigma}_2 = 3{,}26 + 1{,}69 = 4{,}95$ kg.

Die bei nachgiebigen Pfeilern eintretenden Nebenspannungen fallen wegen der geänderten Elasticitätsziffer etwas geringer aus, als früher berechnet; doch ist die Aenderung so geringfügig, daſs die alten Werthe ohne groſsen Fehler beibehalten werden können. Die Werthe der Gesamtspannungen betragen sodann:

$\bar{\sigma}_1 = -1{,}37 - 2 = -3{,}39$ kg, $\bar{\sigma}_2 = 4{,}95 + 1{,}8 = 6{,}75$ kg.

Die gröſste Zugspannung bleibt hiernach bei Ausführung des Gewölbes in Ziegelmauerwerk unter der Zugfestigkeit $k = 5$ kg, sodaſs sich die Fuge nicht öffnet, eine Riſsbildung nicht eintritt.

Für Betongewölbe kann man setzen $E\omega = 250000 \cdot 0{,}00001 = 2{,}5$. Die Wärmespannungen werden $2{,}5 : 1{,}25 = 2$ mal gröſser als früher berechnet, d. i.

$\tau_1 = -2 \cdot 15{,}56 = -31{,}12$ kg u. $\tau_2 = 2 \cdot 14{,}06 = 28{,}12$ kg.

Da die Zugfestigkeit des Betonmauerwerkes nur etwa 20 kg/qcm beträgt, so müsen hier Risse im Gewölbe auftreten. Dieser Umstand ist um so miſslicher, als bei Beton derartige Risse mehr oder minder unregelmäſsig verlaufen und zu gröſseren Beschädigungen Anlaſs geben können. Bei Gewölben aus Quadern, Schichtensteinen, Ziegeln dagegen bleiben etwaige Risse auf die radial verlaufenden Mörtelfugen beschränkt und sind daher weit weniger schädlich. Durch die Anwendung von Scheitel- und Kämpfergelenken wird den Wärmespannungen fast vollkommen vorgebeugt. Diese Bauweise erscheint daher besonders bei Betongewölben angezeigt, sofern nicht die Rücksicht auf die Nachgiebigkeit der Pfeiler andere Anordnungen verlangt, also insbesondere bei Einzelöffnungen mit starren Widerlagern.

Sehr günstig verhalten sich die Beton-Eisengewölbe (Moniergewölbe u. a.) gegenüber den Wärmeeinflüssen. Abgesehen von ihrer bedeutenden Zugfestigkeit haben sie den weiteren Vorzug einer sehr geringen Gewölbstärke, infolge wovon die Wärmespannungen entsprechend niedriger ausfallen. Die Moniergewölbe sind daher sowohl hinsichtlich der angreifenden als der widerstehenden Kräfte im Vortheil.

Wie aus der Formel für das Wärmemoment,

$$M_t = -\frac{7{,}5\,EI\omega t}{fm},$$

hervorgeht, wachsen die Wärmespannungen in der Kämpferfuge annähernd im umgekehrten Verhältniſs wie die Pfeilhöhe f. Für Halbkreisgewölbe, wo $f = 0{,}5\,l$, sind sie daher annähernd halb so groſs wie für das in den früheren Beispielen vorausgesetzte Gewölbe, wo $f = 0{,}25\,l$; allerdings muſs dann das Halbkreisgewölbe vollständig frei auf seine ganze Länge ausgeführt werden (Abb. 19) und darf keine Hintermauerung, wie solche in Abb. 13 dargestellt, erhalten. Die Wärmespannungen sinken in diesem Falle auf

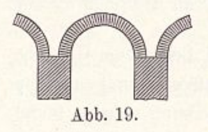


Abb. 19.

$\tau_1 = -0{,}5 \cdot 15{,}56 = -7{,}78$ kg/qcm und
$\tau_2 = +0{,}5 \cdot 14{,}06 = 7{,}3$ kg/qcm.

V. Besondere Anordnungen.

1. Unsymmetrische Pfeiler.

Ein Pfeiler wird unsymmetrisch genannt, wenn die Lager der beiden anstoſsenden Bögen sich in ungleicher Höhe befinden. In Abb. 20 ist der allgemeinste Fall, daſs

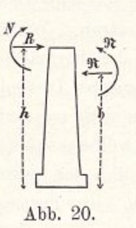


Abb. 20.



Abb. 21.

beide Bögen am Pfeiler eingespannt sind, dargestellt. Durch die auf den Pfeiler einwirkenden Kräfte R, $\mathfrak{R}$ und Momente N, $\mathfrak{N}$ wird derselbe verbogen. Die Ordinaten und Tangentenwinkel der elastischen Linie in den Entfernungen h und $\mathfrak{h}$ von der Pfeilersohle werden mit $\triangle v$, $\triangle \varphi$ und $\triangle \mathfrak{v}$, $\triangle \psi$ (Abb. 21) bezeichnet. Zwischen diesen vier Formänderungen und den vier Kräften und Momenten bestehen folgende vier Beziehungen:

$$\left.\begin{aligned}
\triangle\psi &= \int_0^{\mathfrak{h}} \frac{[R(h-x)+N-\mathfrak{R}(\mathfrak{h}-x)-\mathfrak{N}]\,dx}{\mathfrak{E}\mathfrak{J}} \\
&\quad + \frac{Rh+N-\mathfrak{R}\mathfrak{h}-\mathfrak{N}}{\eta\mathfrak{J}_0} \\
\triangle\mathfrak{v} &= \int_0^{\mathfrak{h}} \frac{[R(h-x)+N-\mathfrak{R}(\mathfrak{h}-x)-\mathfrak{N}](\mathfrak{h}-x)\,dx}{\mathfrak{E}\mathfrak{J}} \\
&\quad + \frac{(Rh+N-\mathfrak{R}\mathfrak{h}-\mathfrak{N})\,\mathfrak{h}}{\eta\mathfrak{J}_0} \\
\triangle\varphi &= \int_0^{h} \frac{[R(h-x)+N]\,dx}{\mathfrak{E}\mathfrak{J}} - \int_0^{\mathfrak{h}} \frac{[\mathfrak{R}(\mathfrak{h}-x)+\mathfrak{N}]\,dx}{\mathfrak{E}\mathfrak{J}} \\
&\quad + \frac{Rh+N-\mathfrak{R}\mathfrak{h}-\mathfrak{N}}{\eta\mathfrak{J}_0} \\
\triangle v &= \int_0^{h} \frac{[R(h-x)+N](h-x)\,dx}{\mathfrak{E}\mathfrak{J}} \\
&\quad - \int_0^{\mathfrak{h}} \frac{[\mathfrak{R}(\mathfrak{h}-x)+\mathfrak{N}](h-x)\,dx}{\mathfrak{J}\mathfrak{E}} \\
&\quad + \frac{(Rh+N-\mathfrak{R}\mathfrak{h}-\mathfrak{N})\,h}{\eta\mathfrak{J}_0}
\end{aligned}\right\} \quad (81)$$

Für ein unveränderliches Trägheitsmoment $\mathfrak{J}$ oder für einen entsprechenden Mittelwerth gehen vorstehende Gleichungen über in

$$\left.\begin{aligned}
\triangle\psi &= \frac{R\left(h\mathfrak{h}-\frac{\mathfrak{h}^2}{2}\right)+N\mathfrak{h}-\frac{\mathfrak{R}\mathfrak{h}^2}{2}-\mathfrak{N}\mathfrak{h}}{\mathfrak{E}\mathfrak{J}} \\
&\quad + \frac{Rh+N-\mathfrak{R}\mathfrak{h}-\mathfrak{N}}{\eta\mathfrak{J}_0} \\
\triangle\mathfrak{v} &= \frac{R\left(\frac{h\mathfrak{h}^2}{2}-\frac{\mathfrak{h}^3}{6}\right)+\frac{N\mathfrak{h}^2}{2}-\frac{\mathfrak{R}\mathfrak{h}^3}{3}-\frac{\mathfrak{N}\mathfrak{h}^2}{2}}{\mathfrak{E}\mathfrak{J}} \\
&\quad + \frac{(Rh+N-\mathfrak{R}\mathfrak{h}-\mathfrak{N})\,\mathfrak{h}}{\eta\mathfrak{J}_0} \\
\triangle\varphi &= \frac{\frac{Rh^2}{2}+Nh-\frac{\mathfrak{R}\mathfrak{h}^2}{2}-\mathfrak{N}\mathfrak{h}}{\mathfrak{E}\mathfrak{J}} + \frac{Rh+N-\mathfrak{R}\mathfrak{h}-\mathfrak{N}}{\eta\mathfrak{J}_0} \\
\triangle v &= \frac{\frac{Rh^3}{3}+\frac{Nh^2}{2}-\mathfrak{R}\left(\frac{\mathfrak{h}^2 h}{2}-\frac{\mathfrak{h}^3}{6}\right)-\frac{\mathfrak{N}(h\mathfrak{h}-\mathfrak{h}^2)}{2}}{\mathfrak{E}\mathfrak{J}} \\
&\quad + \frac{(Rh+N-\mathfrak{R}\mathfrak{h}-\mathfrak{N})\,h}{\eta\mathfrak{J}_0}
\end{aligned}\right\} \quad (82)$$

Das Gleichgewicht der am r. Pfeiler angreifenden Kräfte verlangt

$$\left.\begin{aligned}
R_r &= \mathfrak{H}_{r-1} \\
N_r &= \mathfrak{M}''_{r-1} - C_{r-1}\cdot c_{r-1} \\
\mathfrak{R}_r &= \mathfrak{H}_r \\
\mathfrak{N} &= \mathfrak{M}'_r - C_r\cdot c_r
\end{aligned}\right\} \quad . \; . \; . \; (83)$$

Die Bogenschübe $\mathfrak{H}$ und Eisenspannungsmomente $\mathfrak{M}'$ und $\mathfrak{M}''$ lassen sich mit Hülfe der Gleichungen (50[b]) durch die Verschiebungen $\triangle v$ bezw. $\triangle\mathfrak{v}$ und die Tangentenwinkel $\triangle\varphi$ bezw. $\triangle\psi$ ausdrücken; das Gleiche ist mit Hülfe der Gleichungen (81) bezw. (82) bezüglich der Gröſsen R, N, $\mathfrak{R}$, $\mathfrak{H}$ der Fall. Die Gleichungen (83) enthalten sodann nur noch Formänderungsgröſsen $\triangle\varphi$, $\triangle\psi$, $\triangle v$, $\triangle\mathfrak{v}$ als Unbekannte und bilden die Grundgleichungen zur Lösung der Aufgabe. Sie lassen sich so oft mal aufstellen, als Pfeiler vorhanden, und reichen daher zur Bestimmung der in gleicher Zahl vorhandenen Unbekannten aus.

2. Zugstangen und Spanngurten.

Die schädlichen Einwirkungen, die bei Belastung einzelner Oeffnungen infolge der Nachgiebigkeit der Pfeiler eintreten, können ganz oder theilweise durch die Anordnung von Zugstangen oder von Spanngurten aufgehoben werden.

Zugstangen werden insbesondere bei eisernen Bögen, die über die Fahrbahn emporragen, ausgeführt, in Verbindung mit einer freien Auflagerung des Eisenwerkes. Man erhält Bögen mit aufgehobenem Schub, die wie Balkenträger nur lothrechte Drücke bei lothrechter Belastung auf die Pfeiler ausüben. Die Pfeiler können dementsprechend ebenso schlank wie die gewöhnlicher Balkenbrücken gehalten werden.

Eine Entlastung der Zugstangen auf Kosten der Endpfeiler kann dadurch erzielt werden, daſs man je zwei zusammenstoſsende Bogenfüſse gemeinsam auf Rollen lagert. Die als gleich angenommenen Bogenschübe der Eigenlast heben sich an allen Zwischenpfeilern auf und kommen nur auf die Endpfeiler zur Wirkung. Die Zugstangen haben nur die von der Verkehrslast herrührenden Bogenschübe aufzunehmen. Unter bestimmten Verhältnissen, wenn die Endpfeiler niedrig und auf Fels gegründet, die Preise für Mauerwerk niedrig und die für Eisenwerk hoch sind, und wenn das Eigengewicht verhältniſsmäſsig groſs ist, kann die angegebene Bauweise vor der üblichenden Vorzug verdienen.

Bei eisernen Bogenträgern mit obenliegender Fahrbahn, sowie bei Gewölben kommen Zugstangen für Brückenbauten vornehmlich aus ästhetischen Gründen wohl kaum in Betracht. Sie werden höchstens in Nothfällen zur Ausführung gelangen, wenn sich die Pfeiler nachträglich zu schwach erwiesen haben, ein vollständiger Neubau z. Z. nicht angängig ist und die Anordnung von Spanngurten nicht zweckmäſsig erscheint.

Spanngurten sind Steinbalken, die meist in Kämpferhöhe von Pfeiler zu Pfeiler bis zu den Endpfeilern reichen und durch besondere oder mit ihnen unmittelbar zusammenhängende Gewölbe getragen werden (Abb. 22). Sie halten bei

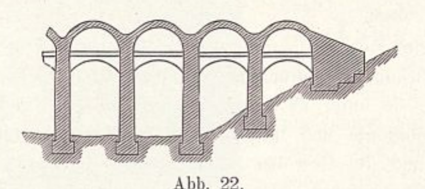


Abb. 22.

angemessener Ausführung durch ihren Druck-, Zug- und Biegungswiderstand die Verschiebungen und Drehungen der Pfeilerköpfe in praktisch unschädlichen Grenzen, sodaſs sich die einzelnen Gewölbe der Bogenreihe fast vollkommen wie Gewölbe zwischen starren Pfeilern verhalten.

Bei Dreigelenkbogen wird der Schub der belasteten Oeffnung ($=vH$) theils durch den Zugwiderstand des eigenen Spanngurtes aufgehoben, theils durch den Druckwiderstand der benachbarten Spanngurten auf die starren Endpfeiler übertragen. Der erste Theil beträgt

$$vH_1 = vH\frac{(n-1)\eta}{1+(n-1)\eta}, \text{ der zweite } vH_2 = \frac{vH}{1+(n-1)\eta} \quad (84)$$

wo $\eta = E'':E'$ gleich dem Verhältniſs der Elasticitätsziffern für Zug und für Druck. Für

$$E' = E'' \text{ wird } \eta = 1,\ vH_1 = vH\frac{n-1}{n},\ vH_2 = \frac{vH}{n}.$$

Wenn die Spanngurten nur Druckkräfte übertragen können, so wird $vH_1 = 0$ und $vH_2 = vH$.

Die vorstehenden Ergebnisse können annähernd auch auf Zweigelenkbogen und gelenklose Bogen angewandt werden, so lange sich keine Temperaturrisse gebildet haben.

Genauere Ergebnisse erhält man mit Hülfe der entsprechend erweiterten Gleichungen (51), d. i. der Gleichungen

$$\left.\begin{array}{l} R_r = \mathfrak{H}_{r-1} - \mathfrak{H}_r + \mathfrak{S}_{r-1} - \mathfrak{S}_r \\ \text{und } N_r = \mathfrak{M}''_{r-1} - \mathfrak{M}'_r + T_r + \mathfrak{B}''_{r-1} - \mathfrak{B}'_r \end{array}\right\} \quad . \quad . \quad (85)$$

Hierin bezeichnen $\mathfrak{S}$ die in den betr. Spanngurten wirkenden Längskräfte, $\mathfrak{B}'$ und $\mathfrak{B}''$ die Einspannungsmomente am linken bezw. rechtseitigen Ende. Die betr. Gröſsen sind mit Hülfe der Gleichungen (50^b) zu bestimmen, unter Berücksichtigung, daſs hierbei $H = M' = M'' = 0$ anzunehmen ist.

Stellt man nur den eigentlichen Spanngurt, ohne das tragende Untergewölbe, in Rechnung, d. h. einen geraden Balken vom Querschnitt F_1 und dem Trägheitsmoment J_1, so liefern, da jetzt $f = 0$, die Gleichungen (70):

$$\alpha = -\frac{EF_1}{l}, \; \alpha' = \alpha'' = \beta = \gamma = 0, \; \beta' = \frac{4EJ_1}{l},$$

$$\beta'' = \frac{2EJ_1}{l}, \; \gamma' = -\frac{2EJ_1}{l}, \; \gamma'' = -\frac{4EJ_1}{l},$$

und die Gleichungen (50^b):

$$\left.\begin{array}{l} \mathfrak{S} = -\dfrac{EF_1 \triangle l}{l} \\ \mathfrak{B}' = \dfrac{4EJ_1 \triangle \varphi'}{l} + \dfrac{2EJ_1 \triangle \varphi''}{l} \\ \mathfrak{B}'' = -\dfrac{2EJ_1 \triangle \varphi'}{l} - \dfrac{4EJ_1 \triangle \varphi''}{l} \end{array}\right\} \quad . \quad . \quad (86)$$

Nach Einsetzen dieser Werthe und der durch die Gleichungen (50^a) und (50^b) bestimmten Werthe von $\mathfrak{H}$, $\mathfrak{M}'$, $\mathfrak{M}''$, R, N in die Gleichungen (85) erhält man die den Gleichungen (52) und (53) entsprechenden Grundgleichungen, welche die Aufgabe lösen.

Bilden sich Temperaturrisse in den Spanngurten, so wird deren Wirkung beeinträchtigt; es treten ähnliche Verhältnisse ein, wie sie unter IV näher beschrieben. Die Bewegungen der Pfeilerköpfe und mithin auch die Beanspruchungen der Pfeiler und der Gewölbe fallen gröſser aus, als bei unverletzten Spanngurten. Doch bleiben sie, bei angemessenen Abmessungen der Spanngurten, innerhalb enger Grenzen. Insbesondere können die unter Ib betrachteten groſsen Ausbiegungen bezw. Ausknickungen der Pfeiler nicht eintreten.

Die Temperaturrisse in den Spanngurten können in ihrer Wirkung dadurch unschädlich gemacht werden, daſs man an geeigneten Stellen entsprechend ausgerüstete Fugen offen läſst und eiserne Keile einsetzt, welche die stete Druckwirkung der Spanngurten sichern und die bei gröſster Kälte erreichte gröſste Fugenweite festhalten. Nachdem sodann die Fugen zu geeigneter Zeit mit Cementmörtel geschlossen, hat man Spanngurten, die bei jedem vorkommenden Wärmegrad sowohl gegen Druck als gegen Zug widerstandsfähig sind und die Pfeilerköpfe fast vollständig festhalten. Allerdings entstehen hierdurch bei gröſster Wärme doppelt so groſse Druckspannungen wie bei dem gewöhnlichen Verfahren, d. i. $2E\omega t$ statt $E\omega t$; doch sind dieselben bei sorgfältiger Ausführung in guten Baustoffen ungefährlich.

Die Bildung von Temperaturrissen wird verhindert durch Anwendung von Mauerwerk, bei welchem das Verhältniſs von Zugfestigkeit zur Wärmespannung d. i. $K : E\omega t$ gröſser als 1 ist.

Unter Benutzung der früher angegebenen Mittelwerthe von K, E, ω und mit $t = 20^0$ erhält man für

Betonmauerwerk $K : E\omega t = 20 : 50 = 0{,}4$,

Ziegelmauerwerk $K : E\omega t = 5 : 3 = 1{,}7$.

Hiernach erscheint Betonmauerwerk wenig, Ziegelmauerwerk dagegen gut für Spanngurten geeignet. Allerdings ist bei diesem Urtheil zu berücksichtigen, daſs die zu Grunde liegenden Versuchswerthe nicht völlig einwandfrei sind und noch der Nachprüfung bedürfen.

Als sehr geeignet für Spanngurten ist die Monier-Bauweise zu bezeichnen. Für Eisen ist $K : E\omega t = 4$, wenn man statt der Zugfestigkeit K nur die Spannung an der Elasticitätsgrenze einführt. Durch passende Bemessung der Eiseneinlagen kann daher stets den Spanngurten die erforderliche Widerstandsfähigkeit gegen die bei groſser Kälte auftretenden Zugspannungen gegeben werden.

Die Ausführung von Spanngurten kann insbesondere bei hohen Pfeilern, geringwerthigem Baugrund und bei Dreigelenkbögen in Frage kommen. Es ist mit Hülfe derselben möglich, auch unter ungünstigen Verhältnissen Gewölbereihen ohne allzu groſse Kosten in sicherer Weise herzustellen. Durch die Ausführung von Gelenken erhält man leichte, von den Wärmeeinflüssen unabhängige Gewölbe, während anderseits die Spanngurten die Kämpfergelenke festhalten und die wagrechten Bogenschübe aufnehmen, sodaſs die Pfeiler nur noch durch lothrechte Kräfte beansprucht werden.

Karlsruhe, im December 1900. Fr. Engeſser.

Buchdruckerei des Waisenhauses in Halle a. d. S.